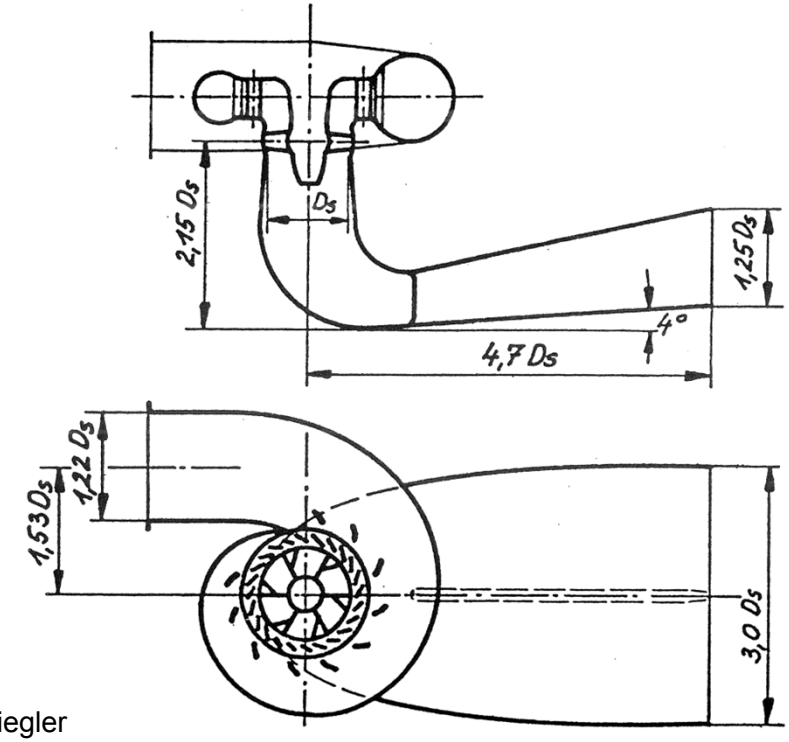
7.3 Kaplan- und Rohrturbine

Größere spezifische Drehzahl als Francis-Turbine, Fallhöhen 70m → 2m

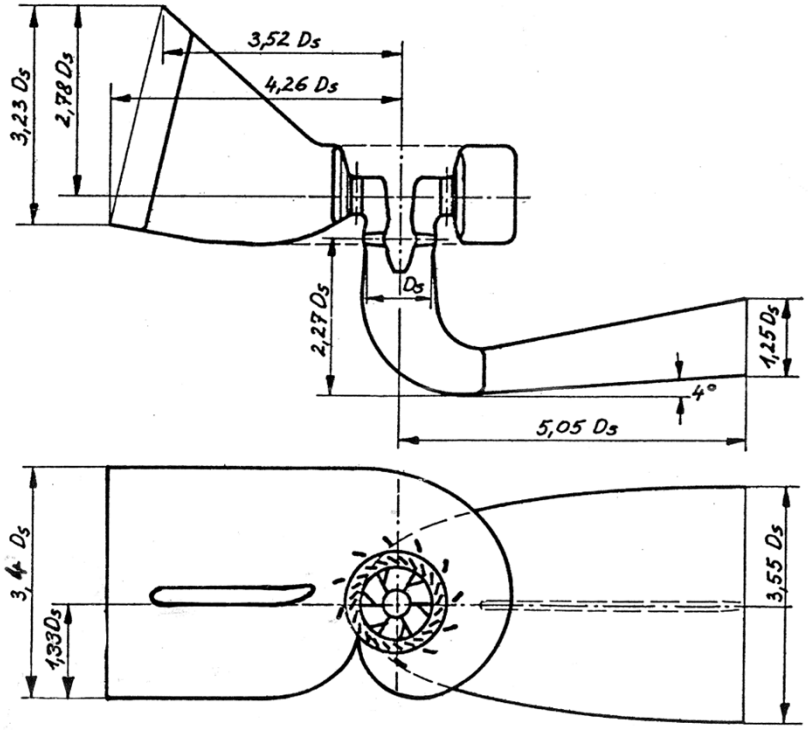
3-8 verstellbare Laufschaufeln → **Doppelregulierung**

Blechspiralen bei größeren Fallhöhen, wg. hohen Anlagendrucks

größere Fallhöhen



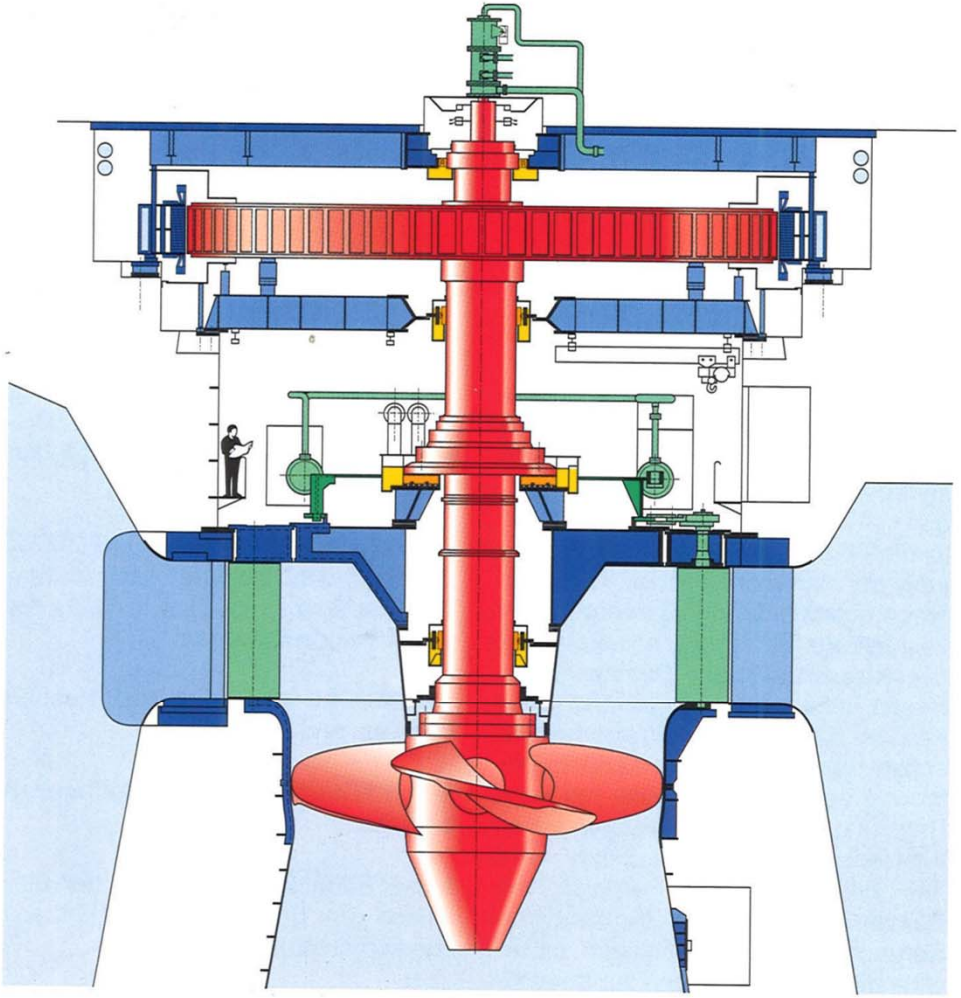
kleinere Fallhöhen



Quelle: Ziegler

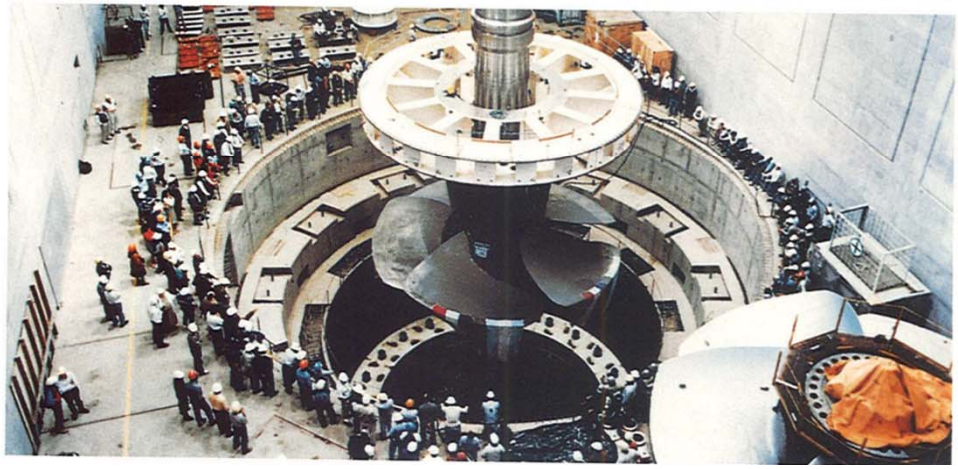
VOITH - Kaplanturbine für Kraftwerk ' YACYRETA ', Argentinien

H = 21.3 m, Q = 793.4 m3/s, P = 154 MW, Laufraddurchmesser = 9500 mm



5-Achsen-Fräsen der Schaufeln und Zusammenbau des Laufrades.

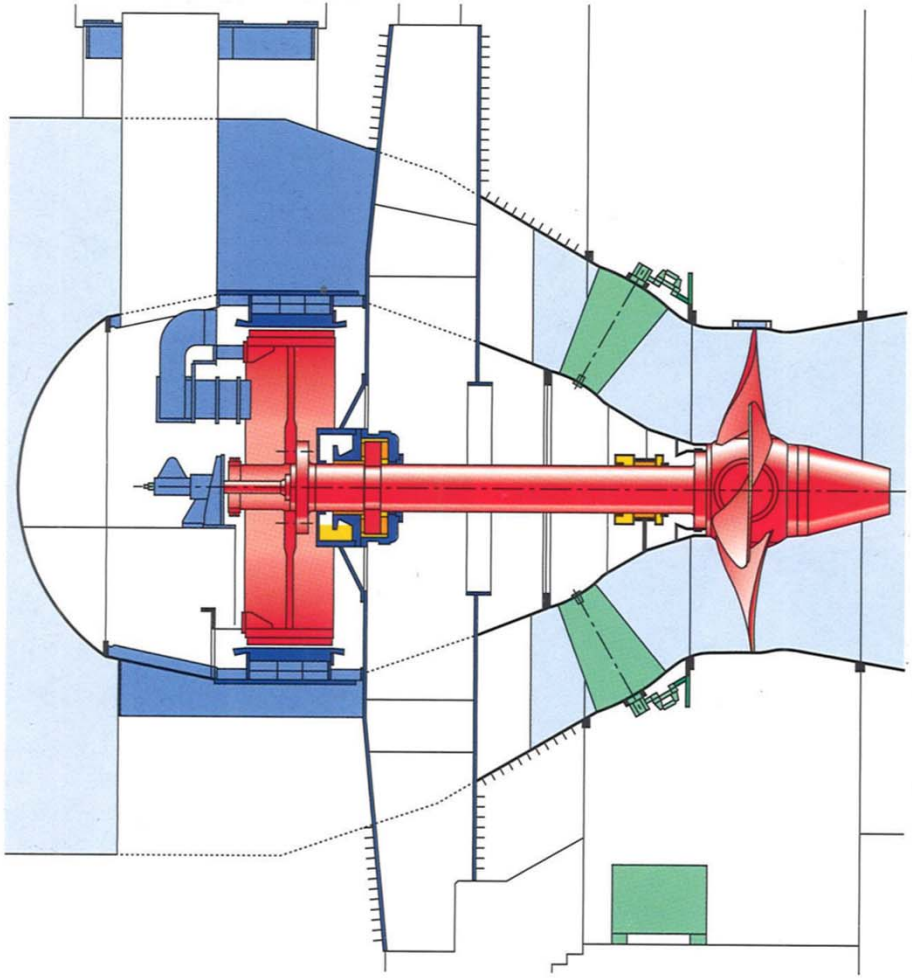
Laufradmontage im Kraftwerk.

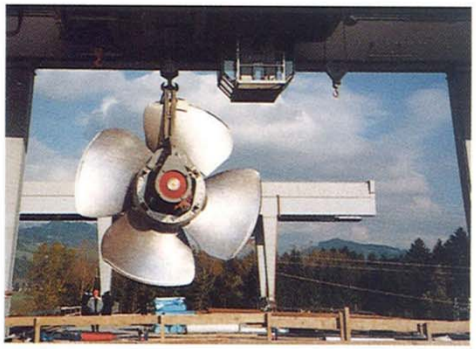


Quelle: Voith

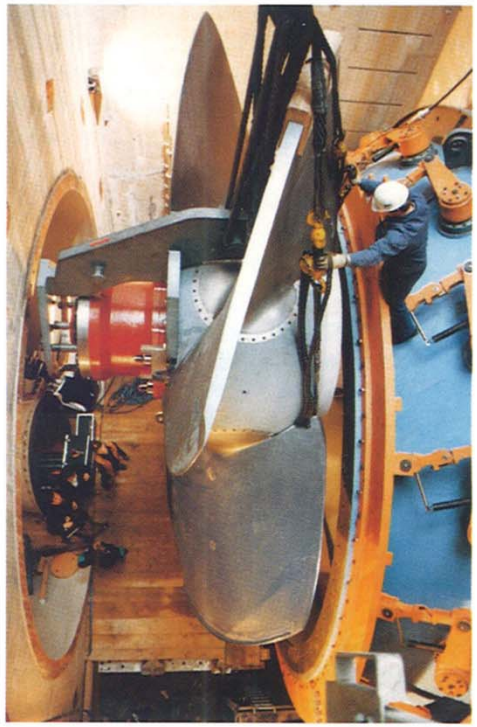
VOITH - Kaplan - Rohrturbine für Kraftwerk ' OBERAUDORF ' BRD

H = 11.6 m, P = 34.5 MW, Q = 290 m3/s, Laufraddurchmesser = 6100 mm



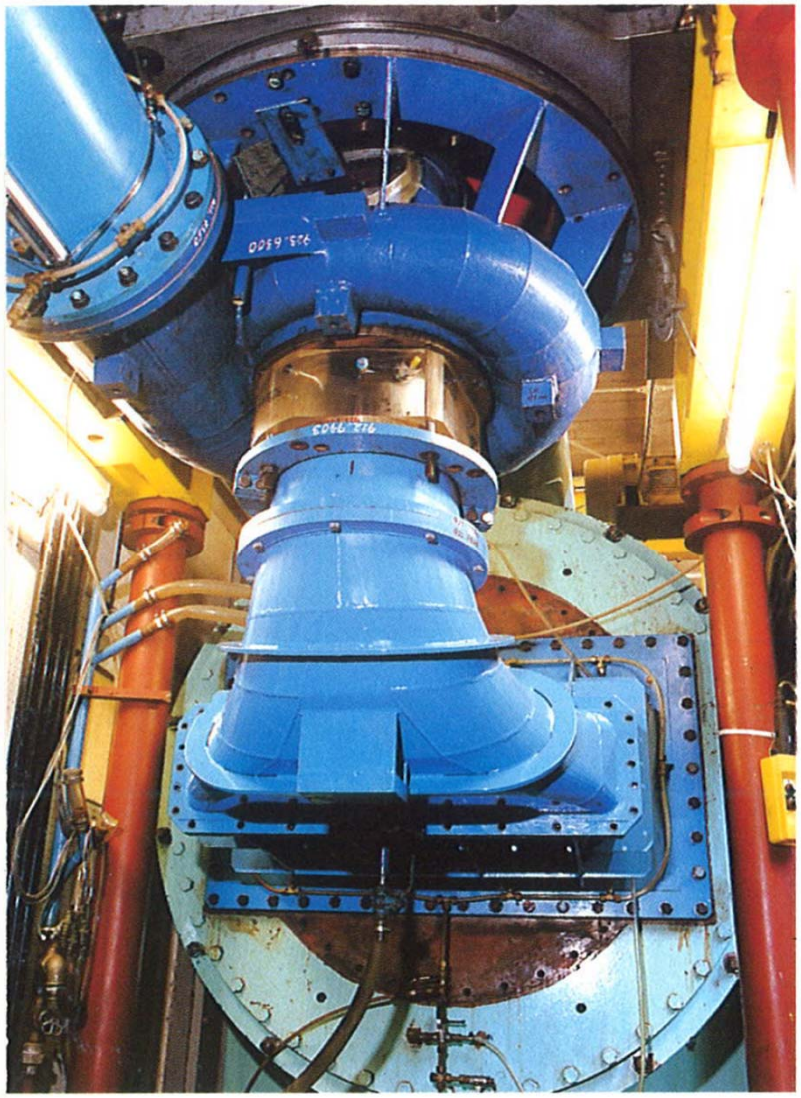


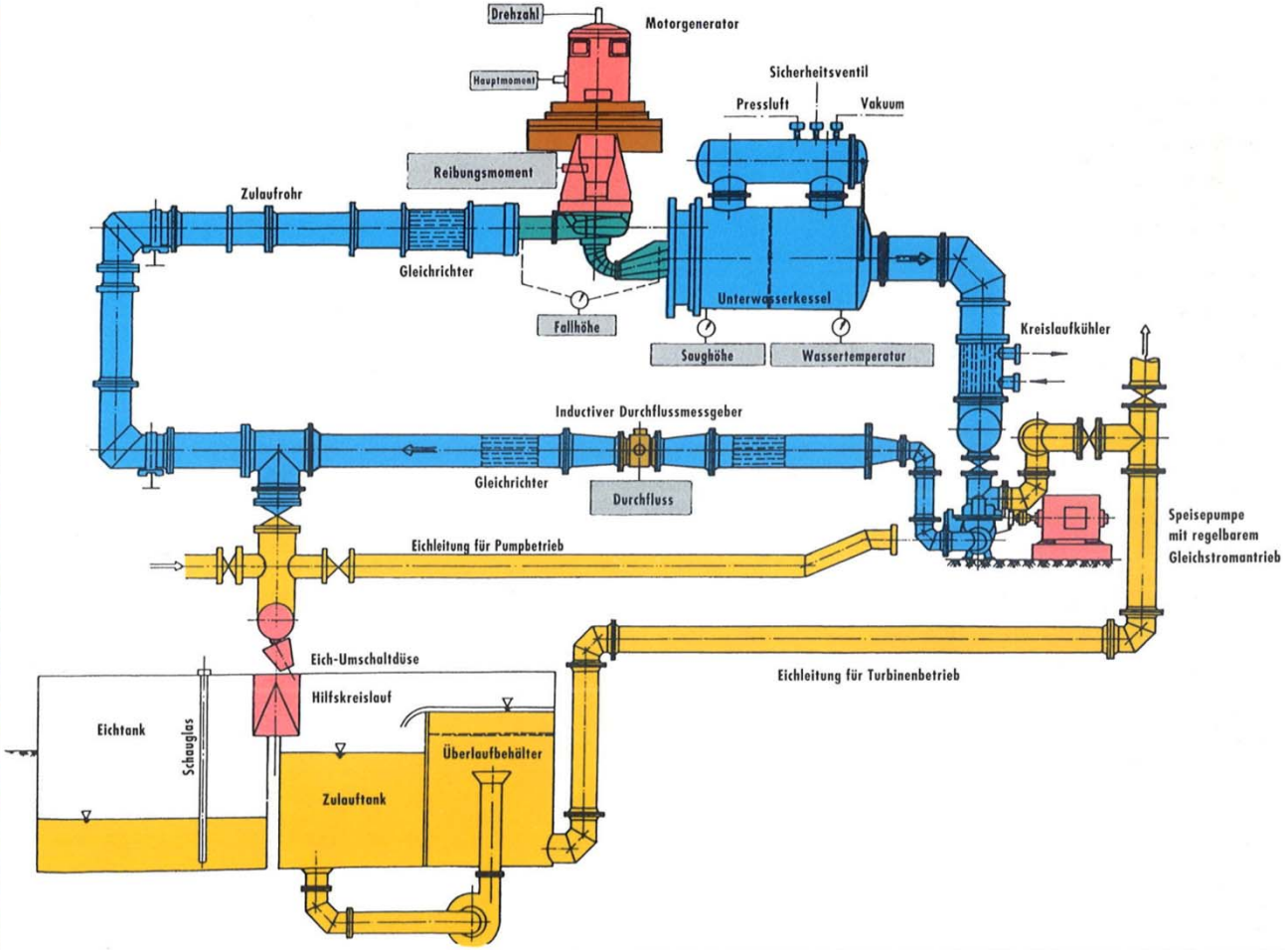
Baustellenmontage: Einfahren von Laufrad und Welle,



Einbau des Laufrades.

Quelle: Voith





Quelle: Voest-Alpine/MCE

Beispiel für Kaplan-Turbine mittlerer Schnellläufigkeit

$$H = 15\,m$$

$$Q = 516\frac{m^3}{s}$$

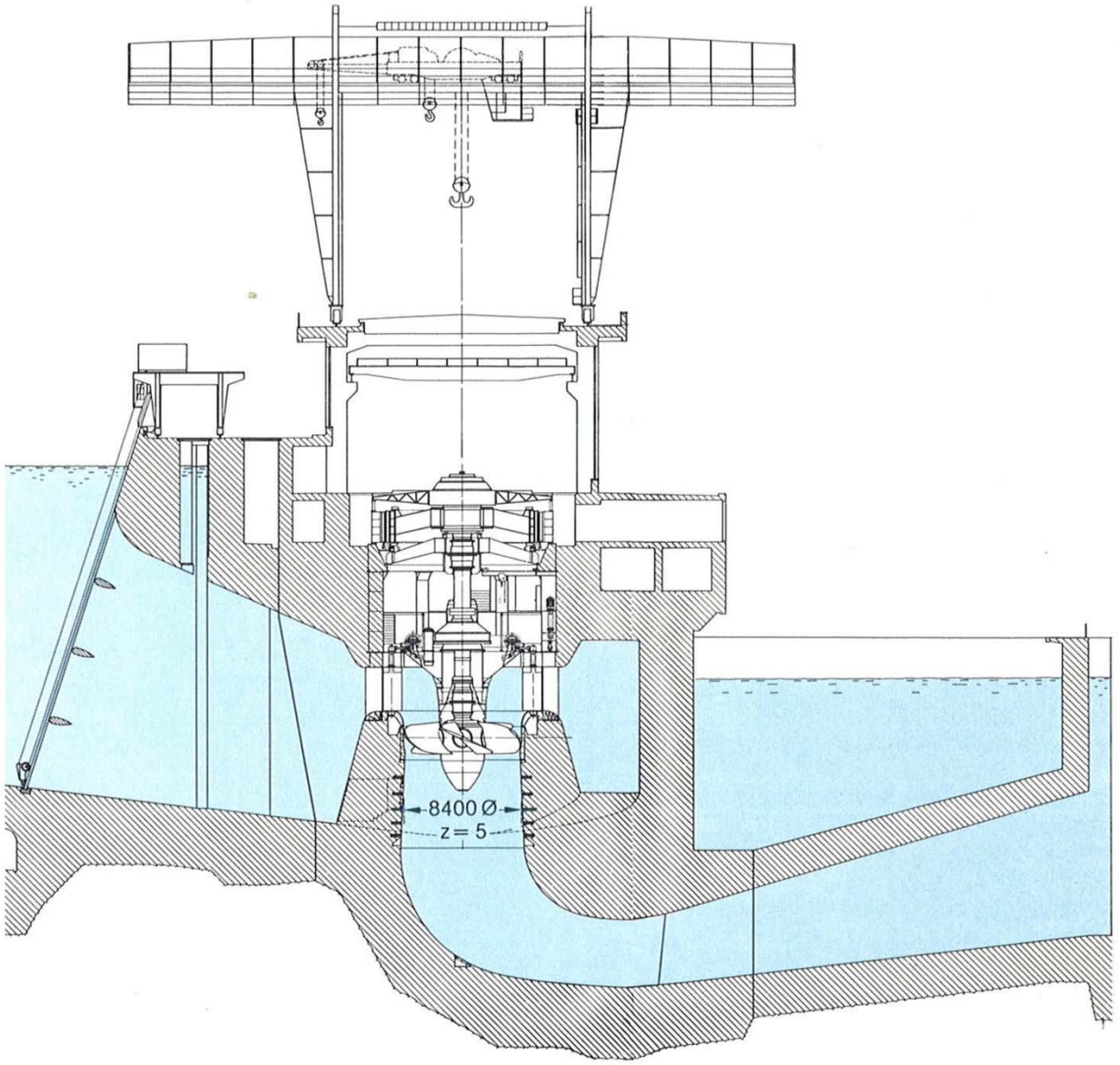
$$n = 68{,}2\frac{U}{min}$$

$$P = 68{,}3\,MW$$

$$n_q = 203{,}25\frac{U}{min}$$

$$n_s = 742\,[PS] = 637\,[kW]$$

Betonspirale reicht wegen niedrigerer Festigkeitsanforderungen



Quelle: Voith

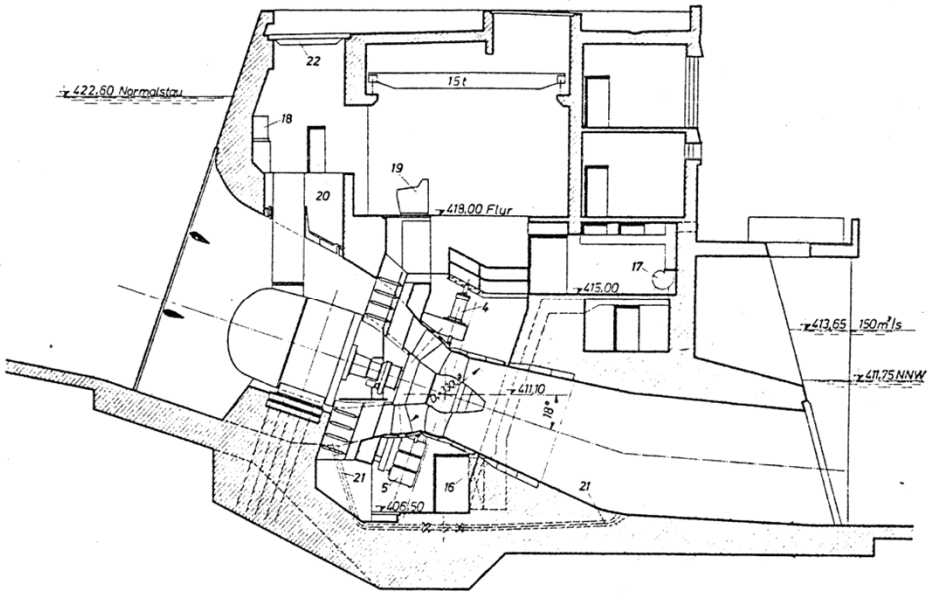
Saugrohr spielt bei zunehmender spezifischer Drehzahl immer wichtigere Rolle:

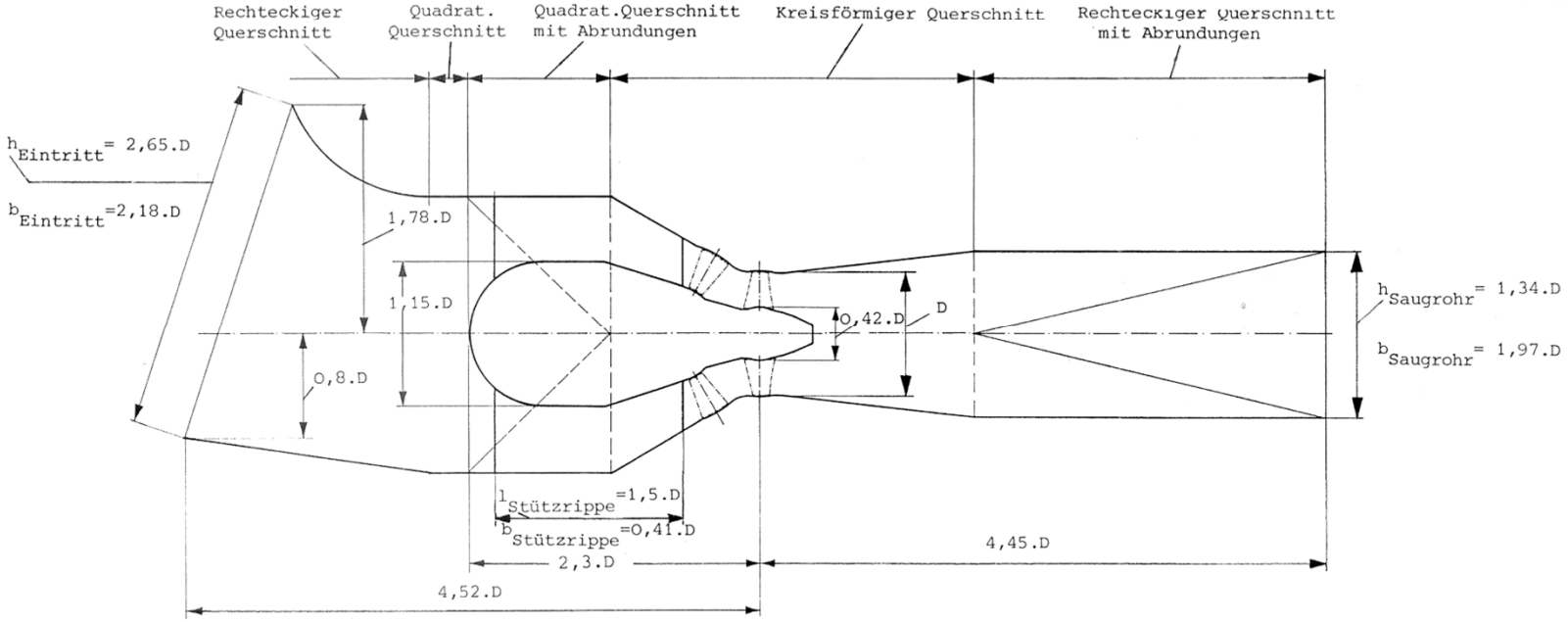
→ gerades Saugrohr → **Rohrturbine**

Generator in „**Birne**“ = engl. **Bulb**

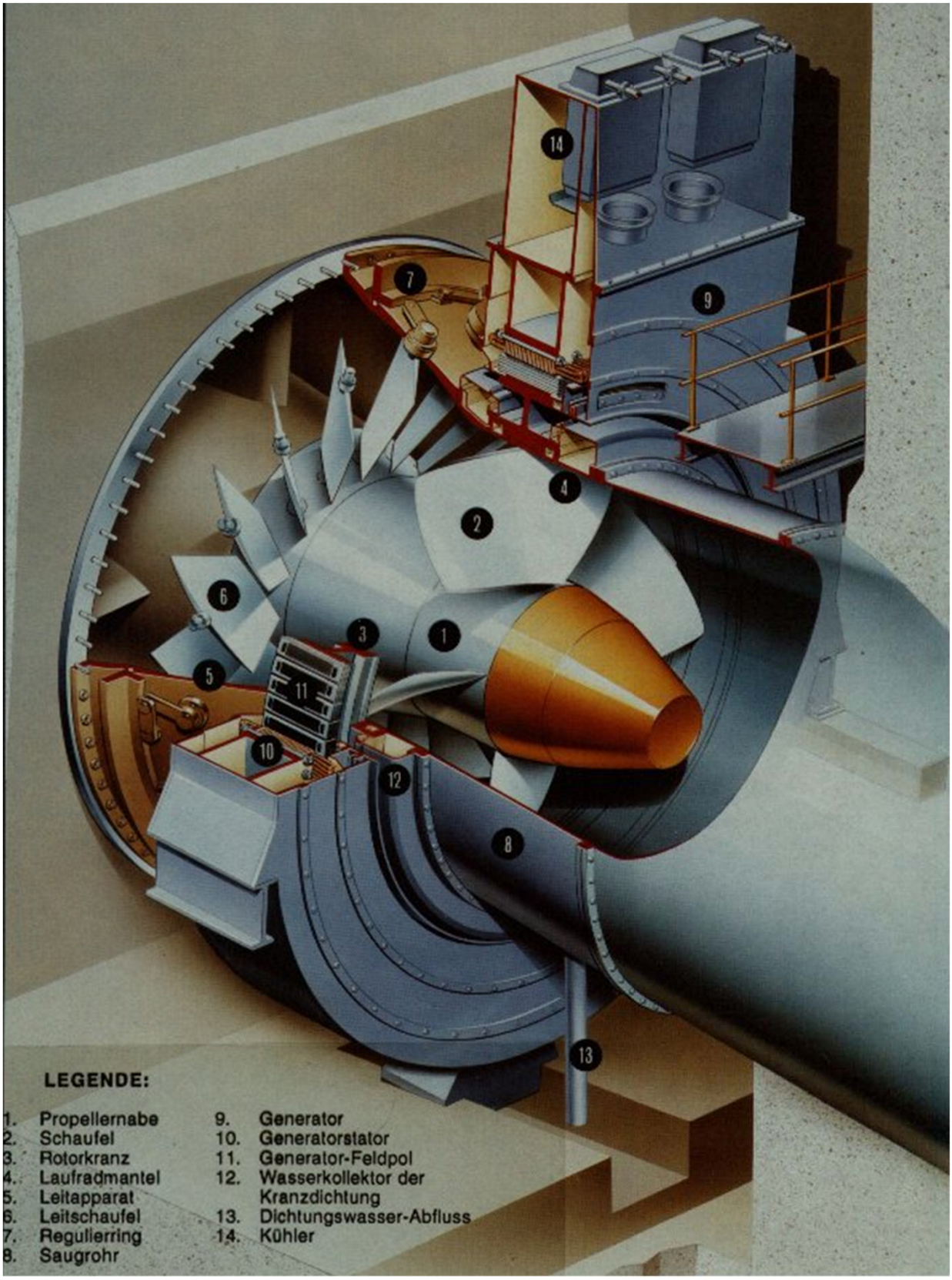
→ Wirkungsgradverlust im Generator

Leitapparat:
- Öffnen durch Servomotor
- Schließen durch Gewicht

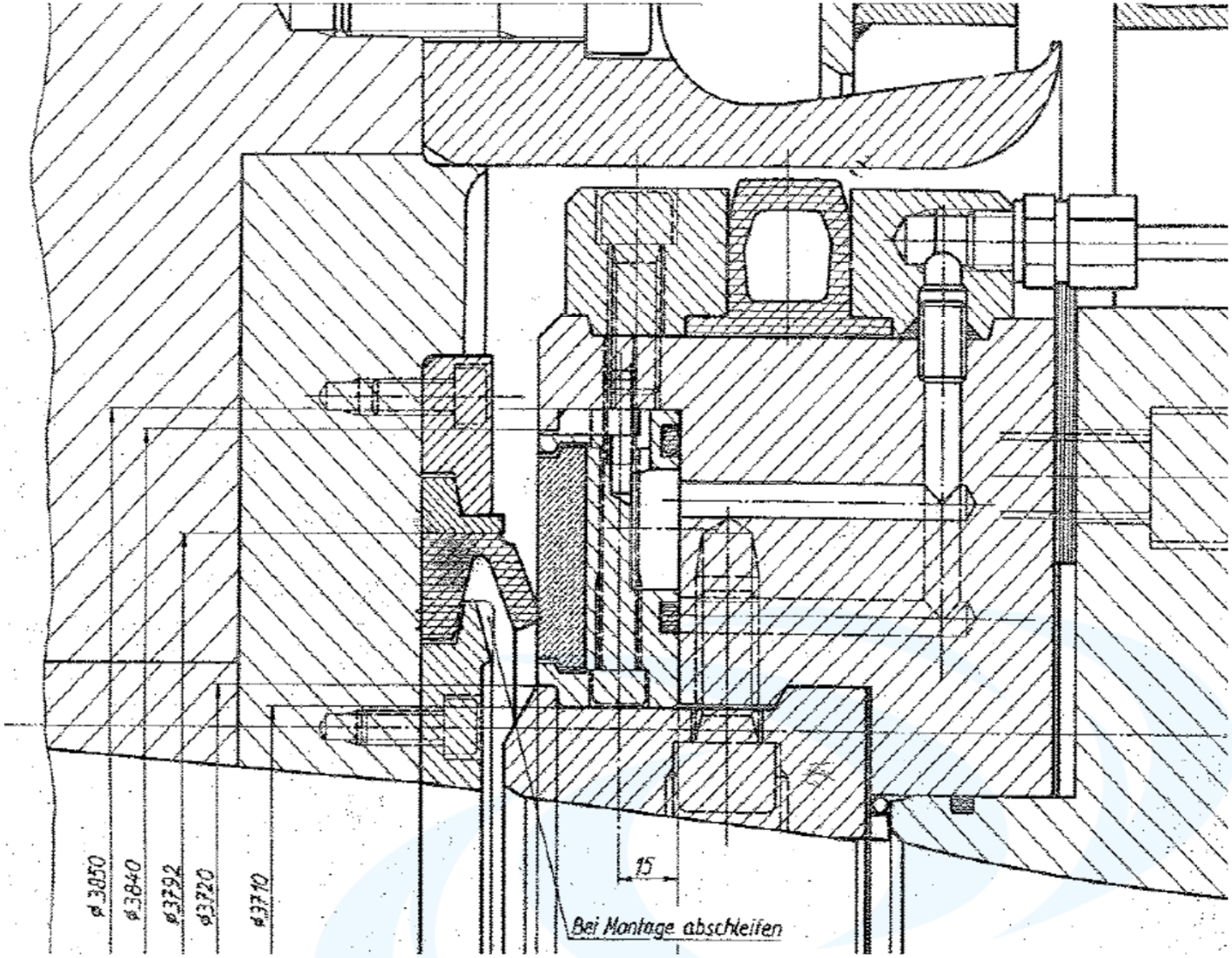




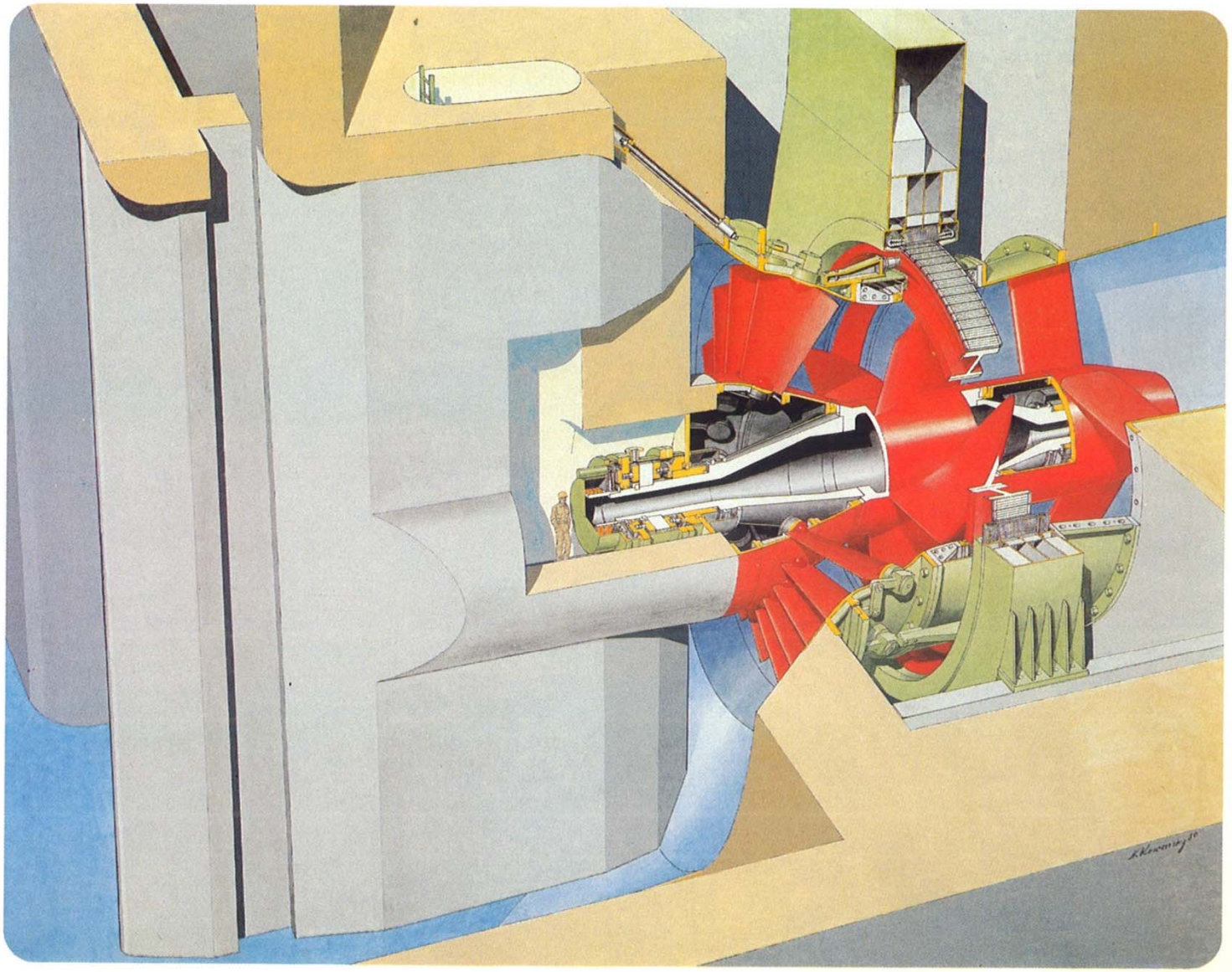
Schnitt durch eine STRAFLO-Turbine



Detail: Außenkranzdichtung der STRAFLO-Turbine am Standort Weinzödl



Die Groß-STRAFLO-Turbine im Einsatz bei einem Gezeitenkraftwerk (Annapolis – CDN)

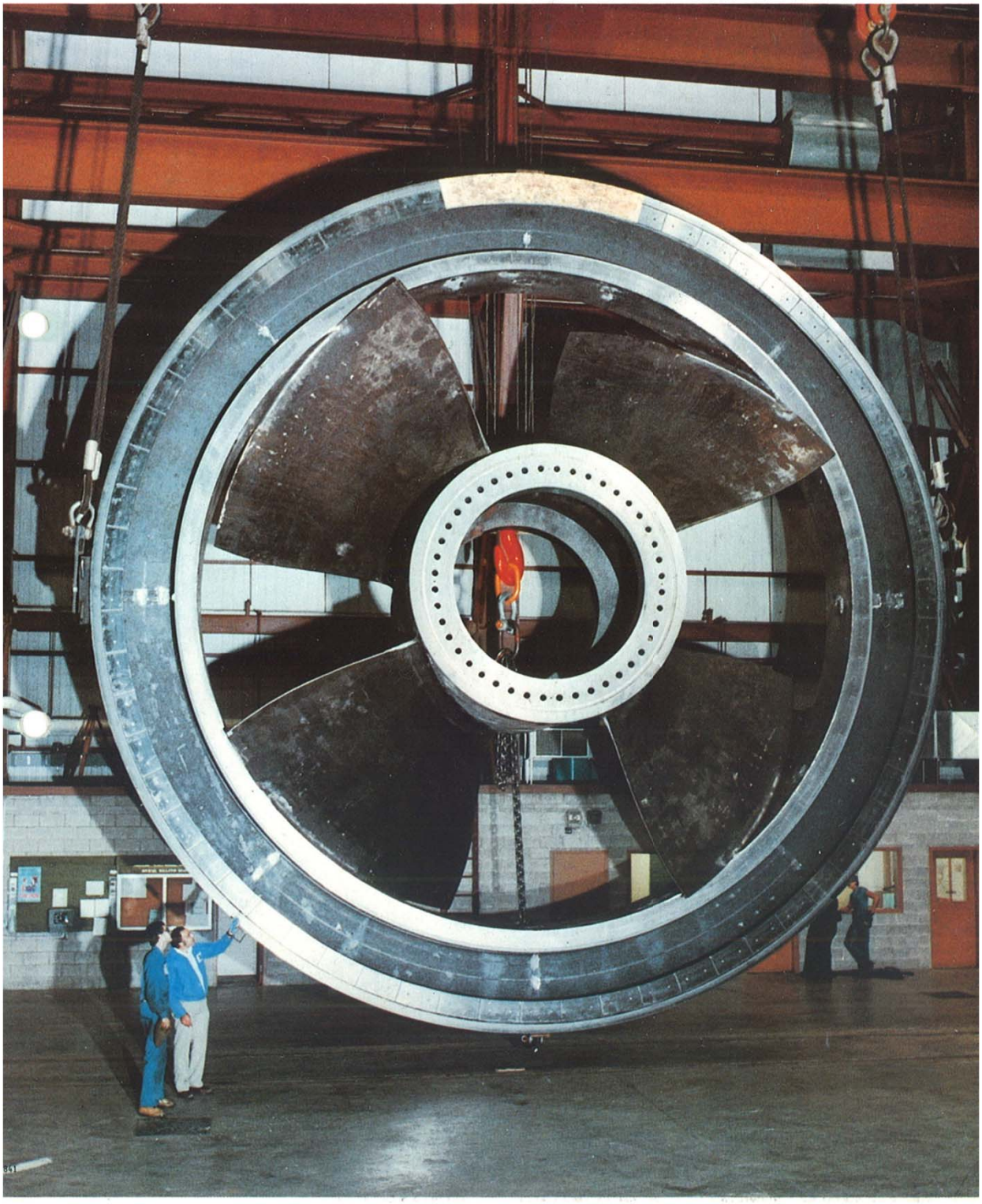


Quelle: Escher-Wyss

Rotor mit Generatorpolen nach Werkmontage der Groß-STRAFLO-Turbine Annapolis

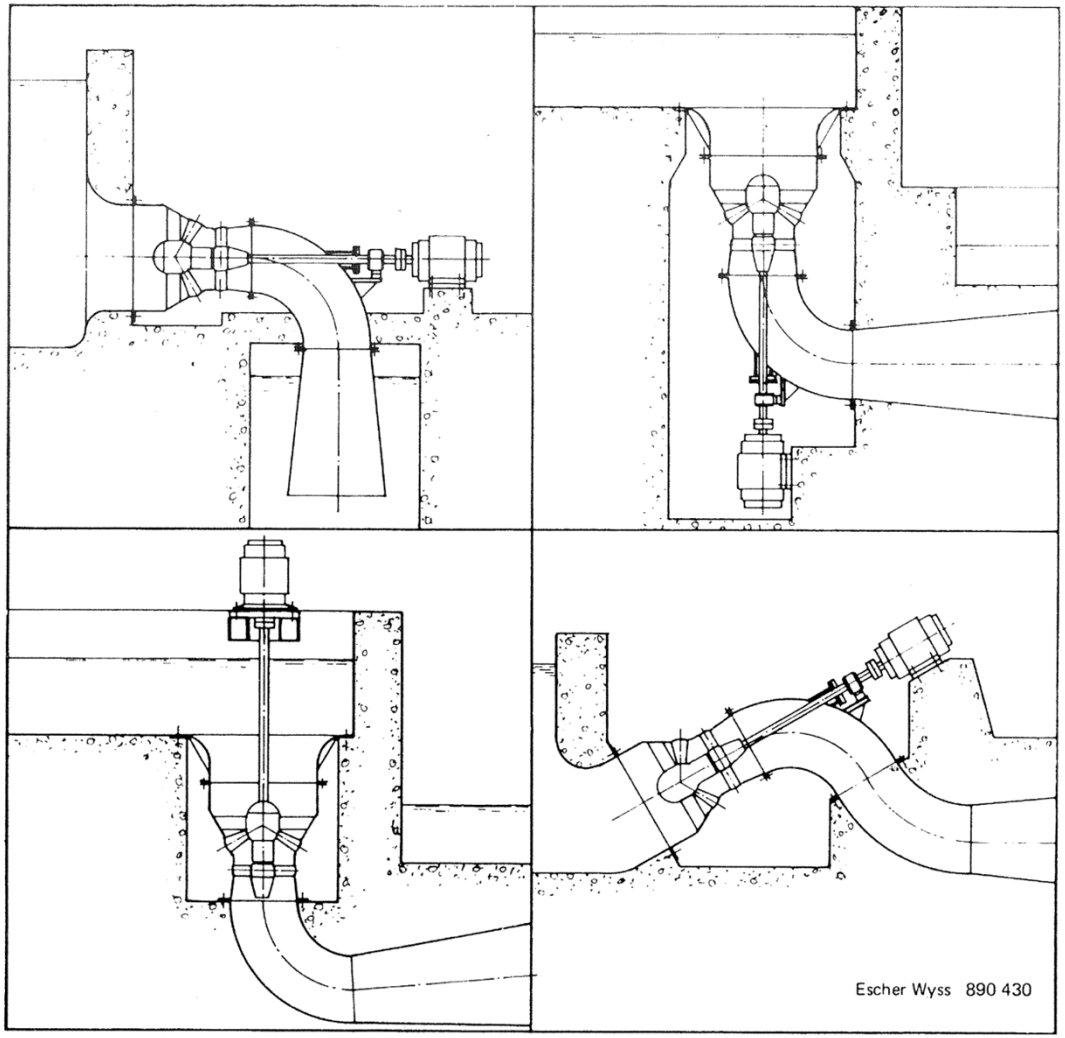
R.P. DeLory Prototyp-Gezeitenkraftwerk erreicht 99% Verfügbarkeit

SULZER ESCHER WYSS

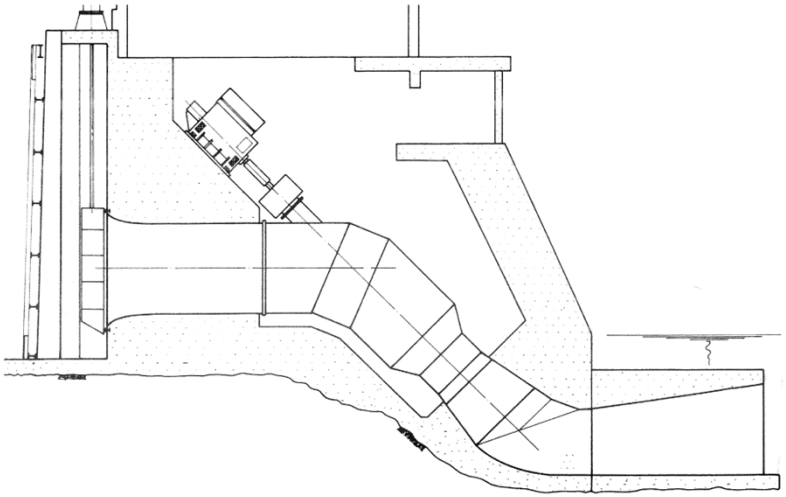


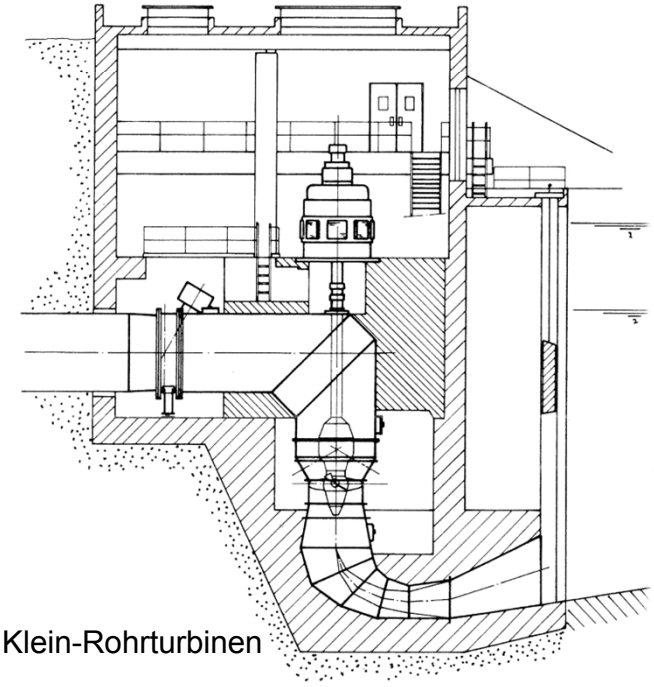
Quelle: Escher-Wyss

Kaplan-Turbinen werden häufig als Klein-Turbinen gebaut

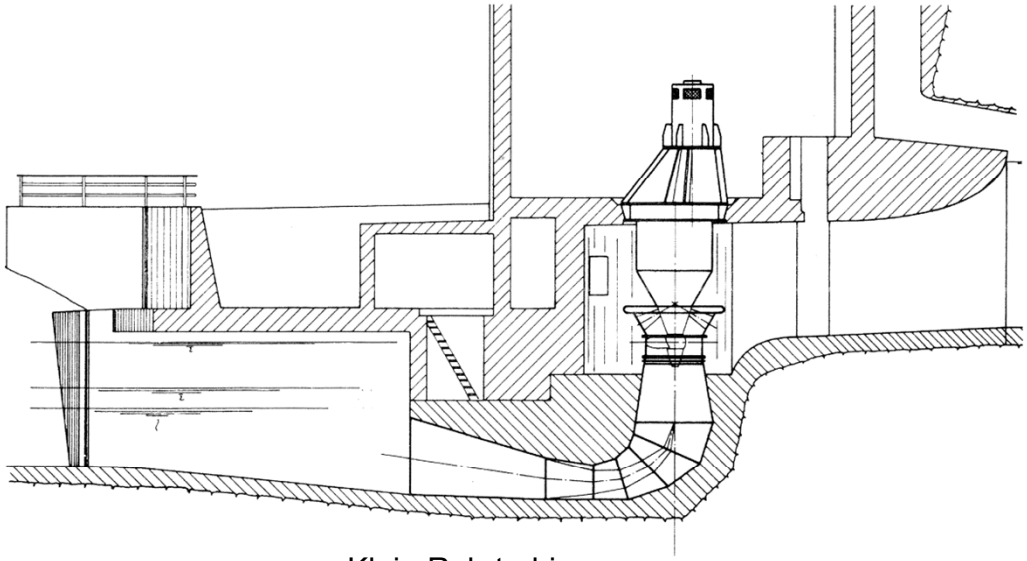


Kaplan-Klein-Turbinen als Vereinfachung der klassischen Rohrturbine

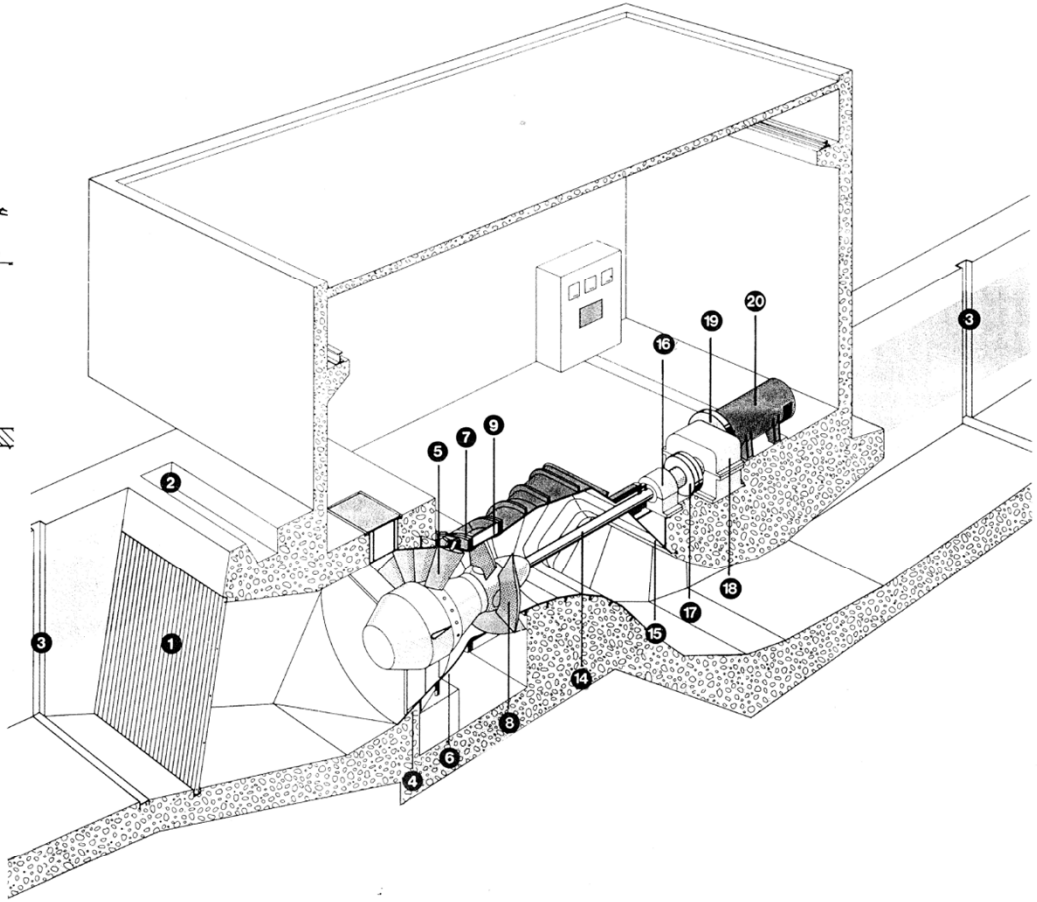




Klein-Rohrturbinen



Klein-Rohrturbinen



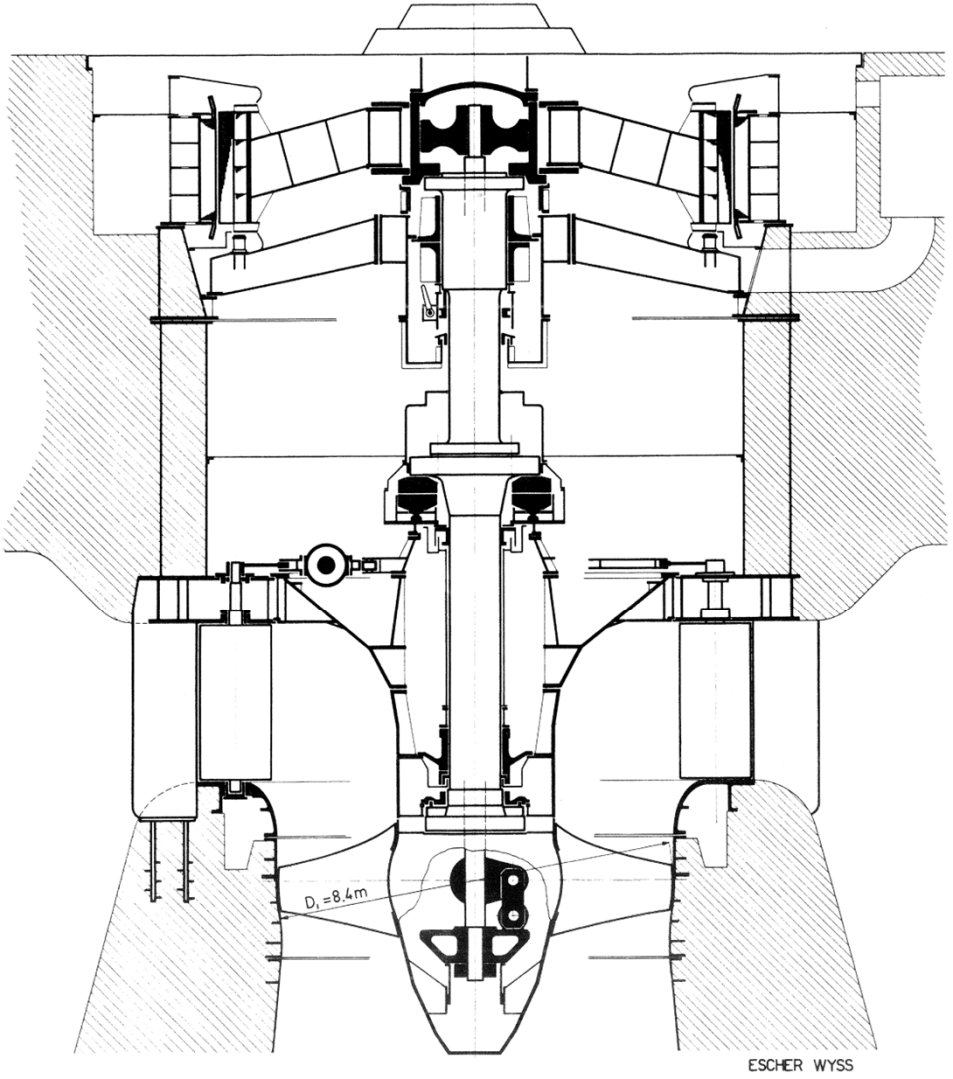
1	Einlaufrechen	9	Laufradring
2	Rinne für Rechengut	14	Turbinenwelle
3	Dammtafelnische	15	Saugkrümmer
4	Turbinentragring	16	Führungslager
5	Leitschaufel	17	elastische Kupplung
6	Leitradring	18	Getriebe
7	Regulierung für Leitrad	19	Schwungrad mit elast.Kupplung
8	Laufrad	20	Generator

Kleinkraftwerk mit Rohrturbine

Laufrad mit Welle

Laufschaufeln der Kaplan-Turbine sind verstellbar: Anpassung an variablen Durchfluss

Verstellung durch Verstellstange in hohler Welle und durch Lenker am Schaufelfuß



Longitudinal section of Kaplan power station Aschach

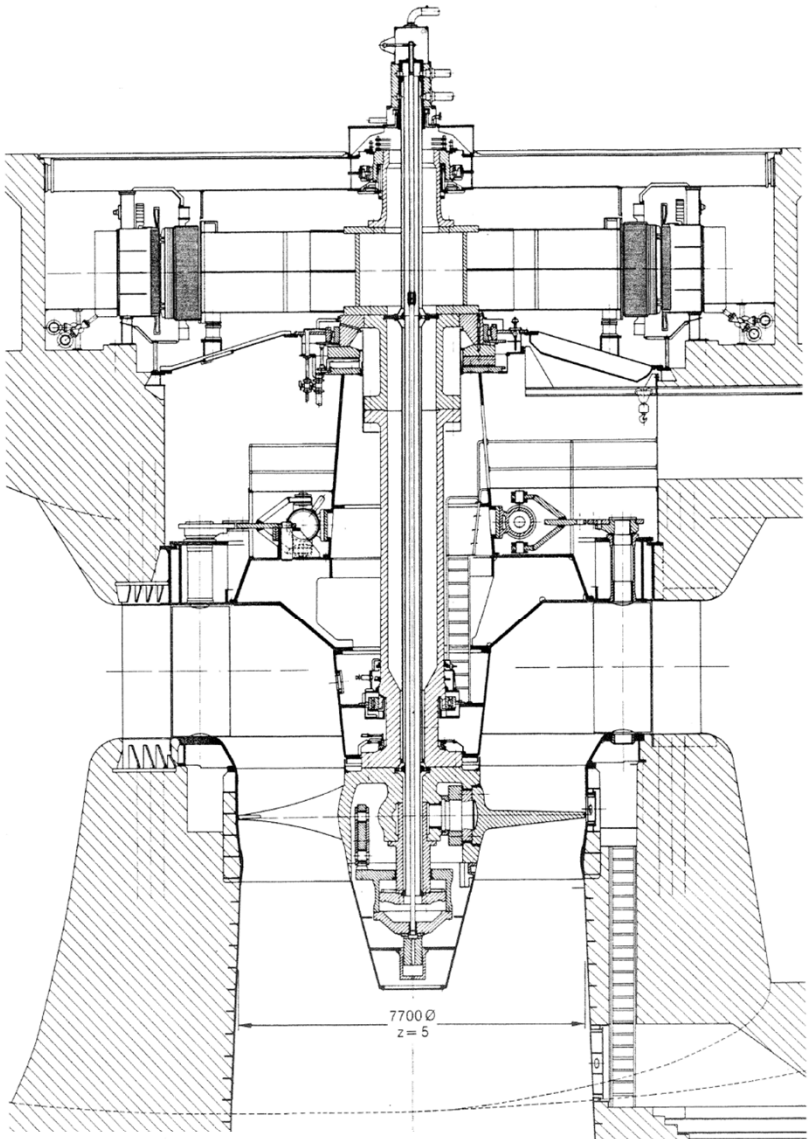
Output	P = 100.000 HP
Net head	H = 15 m (49 ft)
Speed	n = 68.2 rpm
No. of blades	z = 5

Laufschaufelverstellung durch Servomotor in Nabenkörper

Hohlwelle transportiert nur Hydrauliköl

Beanspruchung von Schaufelwurzel

- Momentenbelastung durch Auftrieb und Widerstand
- Fliehkraft durch Rotation
- Instationärer Anteil (10-15% des statischen) reduziert erheblich Lebensdauer (Wöhler-Kurve)
- Biege-Wechsel-Belastung bei Horizontalmaschinen beeinflusst entscheidend die Lebensdauer der Welle
- Kerbwirkung von (Öl-)Bohrungen sorgfältig untersuchen



Kaplan Turbine mit vertikaler Welle,in Betonhalbspirale
H=21.90m, n=85.7U/min, P=103MW

Saugrohr

$$h_v = \frac{{c_e}^2 - {c_a}^2}{2g} \cdot (1 - \eta_D)$$

$$= \frac{Q^2}{2g} \cdot \frac{1}{{A_e}^2} \cdot \left(1 - \frac{{A_e}^2}{{A_a}^2}\right) \cdot (1 - \eta_D)$$

mit $Q = Q_{11} \cdot D^2 \cdot \sqrt{H}$

$$A_e = \frac{\pi {D_s}^2}{4} \cdot (1 - \nu^2)$$

$$h_v = {Q_{11}}^2 \cdot \left(\frac{D}{D_s}\right)^4 \cdot H \cdot \left(1 - \frac{{A_e}^2}{{A_a}^2}\right) \cdot (1 - \eta_D) \cdot \frac{8}{g\pi^2 \cdot (1 - \nu^2)^2}$$

Kaplan:

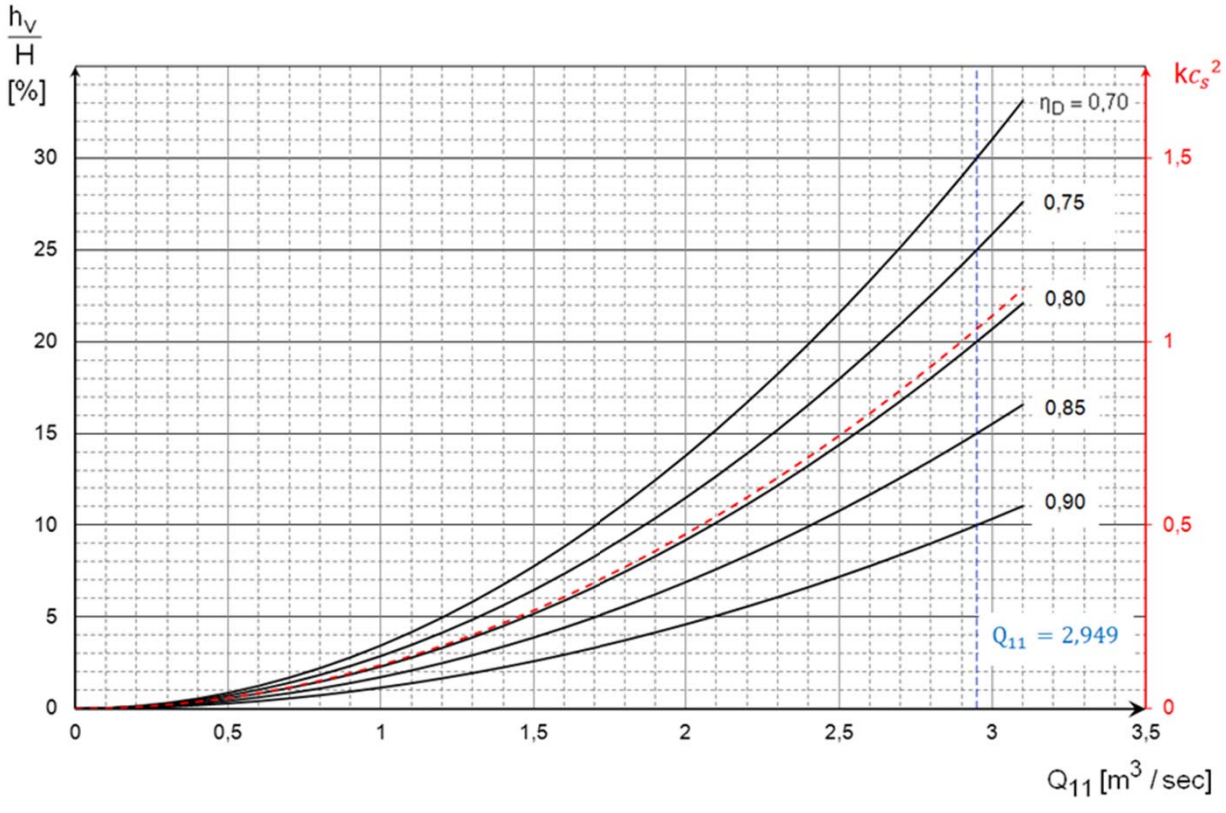
$Q_{11} = 2{,}5$

$D/D_s = 1/0{,}975$

$A_e/A_a = 0{,}2$

$\nu = 0{,}35$

$$h_v = {Q_{11}}^2 \cdot (1 - \eta_D) \cdot 0{,}115$$



- aus $\frac{dh_v/_H}{d\eta} = -1$ (1 Punkt relativer Saugrohrverlust $h_v/_H$ entspricht 1 Punkt Saugrohrwirkungsgrad)

  → $Q_{11} = 2{,}949$

- Wirkungsgradunterschiede Kaplanturbine – Rohrturbine (-6%) entspricht 8% η_D-Verlust

- **Geschwindigkeitshöhe am Saugrohreintritt**…

  …liegt bei der Kaplanturbine in einem engen Band

$$\frac{{c_s}^2}{2gH} = {Kc_s}^2$$

$$Kc_s{}^2 = \frac{c_s}{\sqrt{2gH}} = \frac{Q}{A_s} \cdot \frac{1}{\sqrt{2gH}} = \frac{Q_{11} D^2 \sqrt{H}}{A_s \sqrt{2gH}} = \frac{Q_{11} D^2}{\frac{\pi}{4} \cdot {D_s}^2 \cdot (1 - \nu^2) \cdot \sqrt{2g}}$$

→ mit angegebenen Annahmen für $D/_{D_s}$ und ν

$$Kc_s = Q_{11} \cdot 0{,}345 \quad \leftarrow\rightarrow \quad \boxed{{Kc_s}^2 = {Q_{11}}^2 \cdot 0{,}119}$$

Bestpunkt Turbine-Auslegungspunkt Laufrad

geg.: Q,H,n

Gesamtverlust der Turbine:

$$\sum v_{TU} = \frac{h_{v,Saugrohr}}{H} + \frac{h_{v,La}}{H} + \frac{h_{v,Einlauf+Le}}{H} + \frac{Q_{Spalt}}{Q}$$

Saugrohr: $^{h_v}/_{H} = {Q_{11}}^2 \cdot (1 - \eta_D) \cdot 0{,}115$

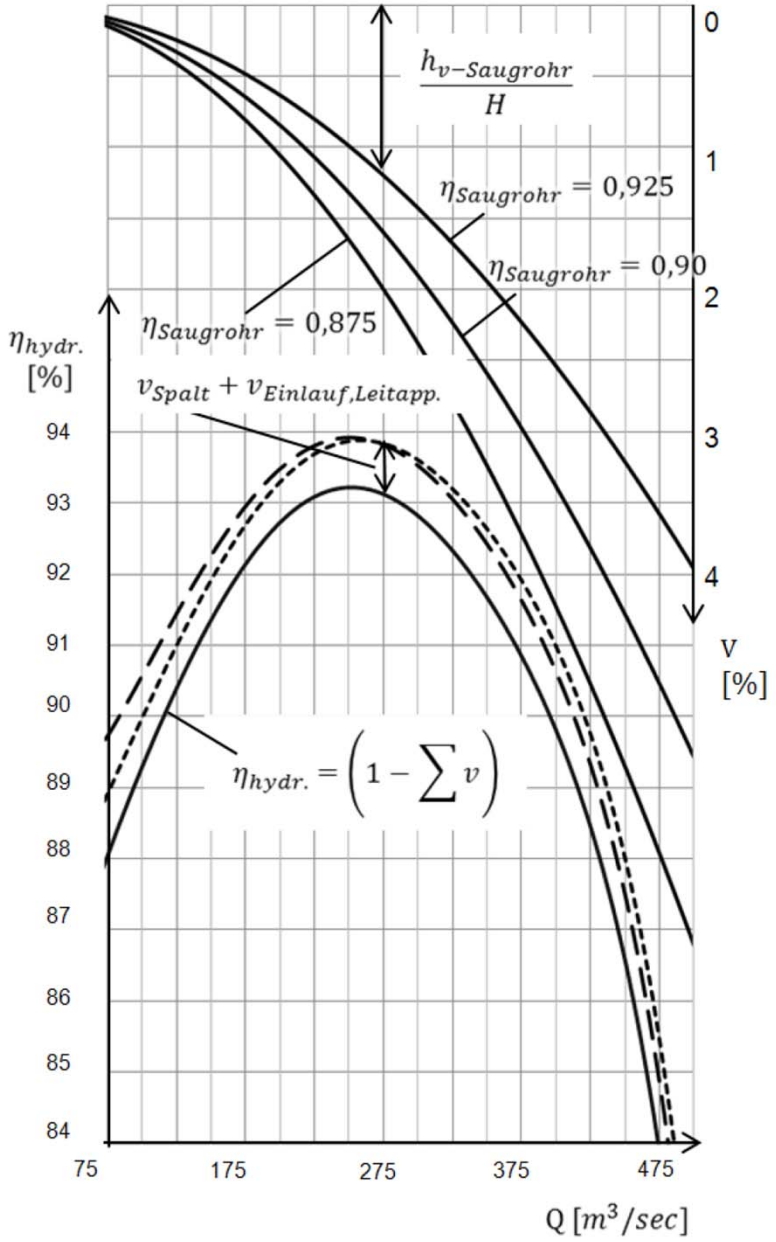
Einlauf: $^{h_v}/_{H} = K_2 \cdot Q^2$

Spalte: $^{Q_{Spalt}}/_{Q} = K_1 \cdot Q$

nach $^{h_{v,La}}/_{H}$ auflösen.

	1	2
Spalt	0,5%	0,25%
Einlauf	0,2%	0,4%
	_ _ _ _ _	.....

alles bei $Q = 250\ m^3/s$



Mit diesen Annahmen:

$\left.\frac{h_v}{H}\right|_{La}$ kann in Abhängigkeit dieser Annahmen berechnet werden

Unterschiedliche Annahmen der Spalt- und Einlaufverluste haben nur geringen Einfluss auf v_{min} bzw. Q_{min}

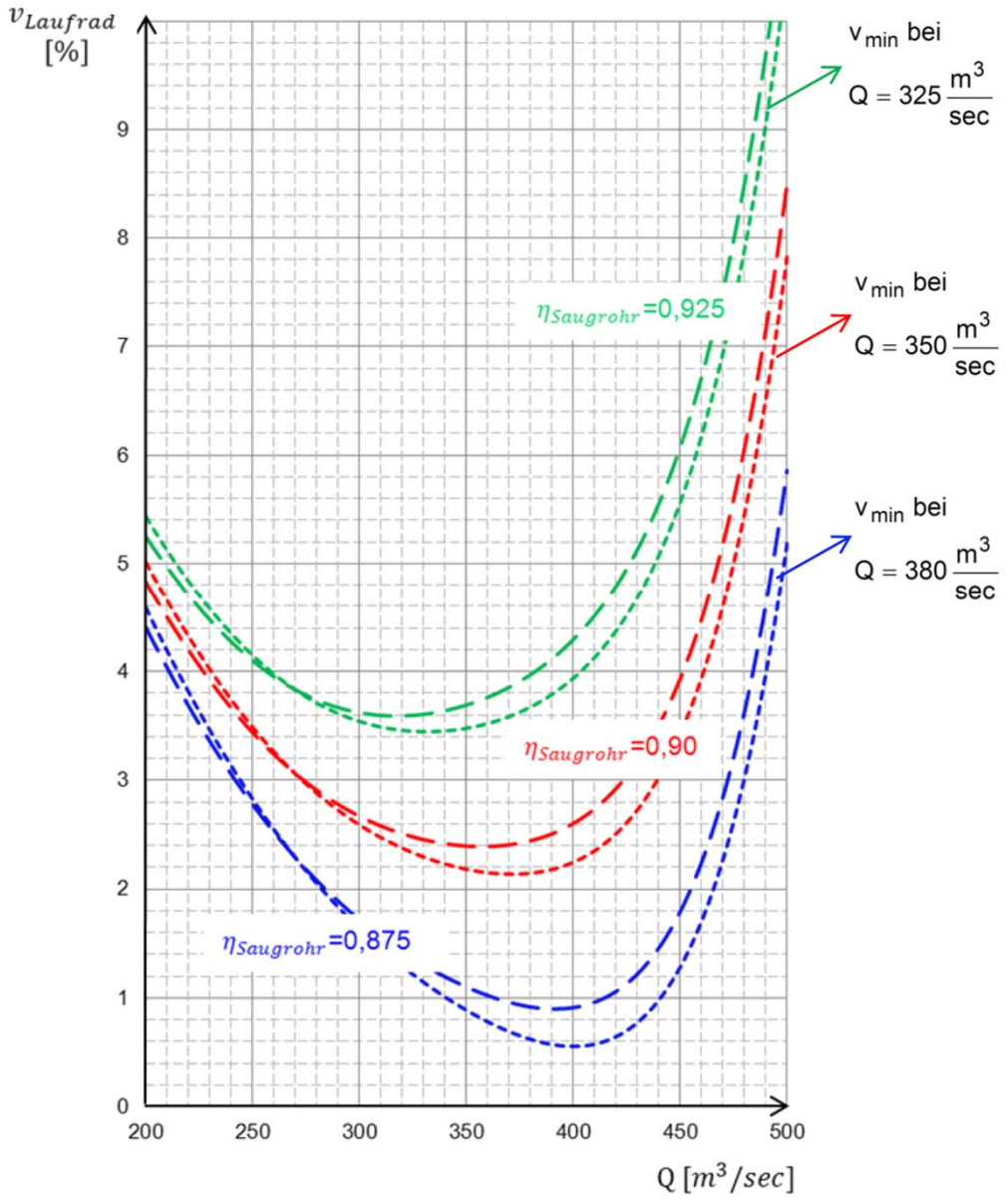
→ optimaler Laufrad-Wirkungsgrad bei $Q \approx 350 m^3/s$

optimaler Turbinen-Wirkungsgrad bei $Q \approx 250 m^3/s$

Laufrad wird für erheblich größeren Durchsatz ausgelegt als Turbine.

Kaplan-Schnellläufer: durchsichtig, 3-4 Schaufeln

Kaplan-Langsamläufer: undurchsichtig, 7-8 Schaufeln



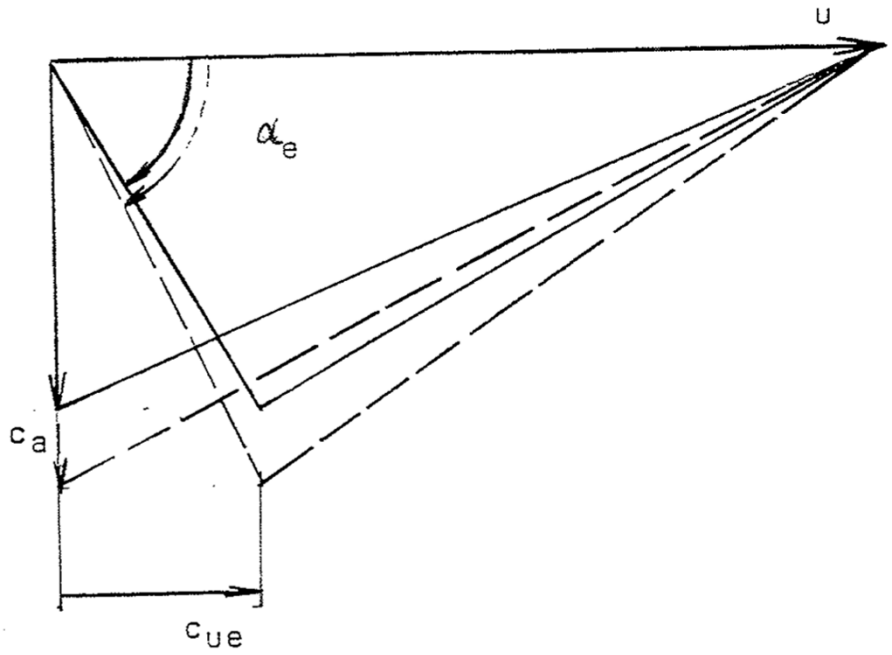
Off Design Behaviour:

Durchsatzänderung

- Steigendes Q bedeutet bei Francis-Turbine Gegendrall am Turbinen-Austritt

  Kaplan: Steiler stellen der Laufschaufel

  → drallfreier Austritt



H = konst, n = konst,
Q variabel, Beispiel Q-Vergrößerung
———— Auslegungspunkt
– – – – – Q-Vergrößerung

- Aus $c_{ue} = {}^{gH}/_{u_e}$ folgt, dass mit steigendem c_m und somit steigendem c_u auch H eigentlich steigt. Zum Ausgleich dieser Tendenz:

  steiler stellen der Leitschaufeln

  → gleicher Drall am Eintritt

- Steilere Le-Abströmung trifft auf steilere Laufradschaufeln

  → Konsequenzen der Falschanströmung nicht so stark ausgeprägt

Fallhöhenänderung

- $c_{ua} = 0$, weil c_m unverändert

$$\frac{c_{ue\,1}}{c_{ue\,2}} = \frac{\eta_u H|_1}{\eta_u H|_2}$$

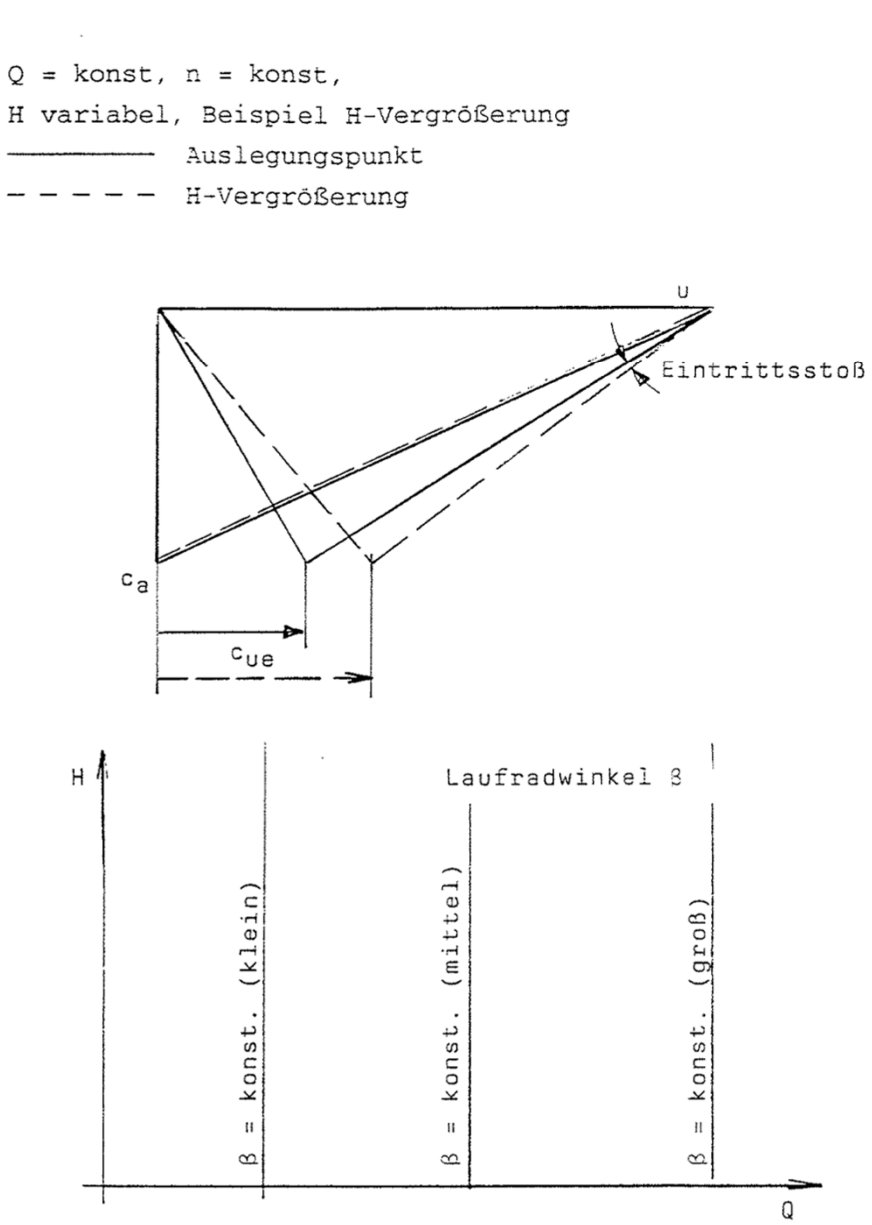
→ Laufradwinkel bleibt unverändert

→ Leitrad muss nachgeführt werden

sinkendes H: Le steiler

steigendes H: Le flacher

Starke Falschanströmung des Laufrades mit negativen Auswirkungen auf Wirkungsgrad und Kavitation



Optimaler Zusammenhang Laufradstellung/Leitradstellung

- Axialturbinen mit nicht verstellbarem Laufrad:

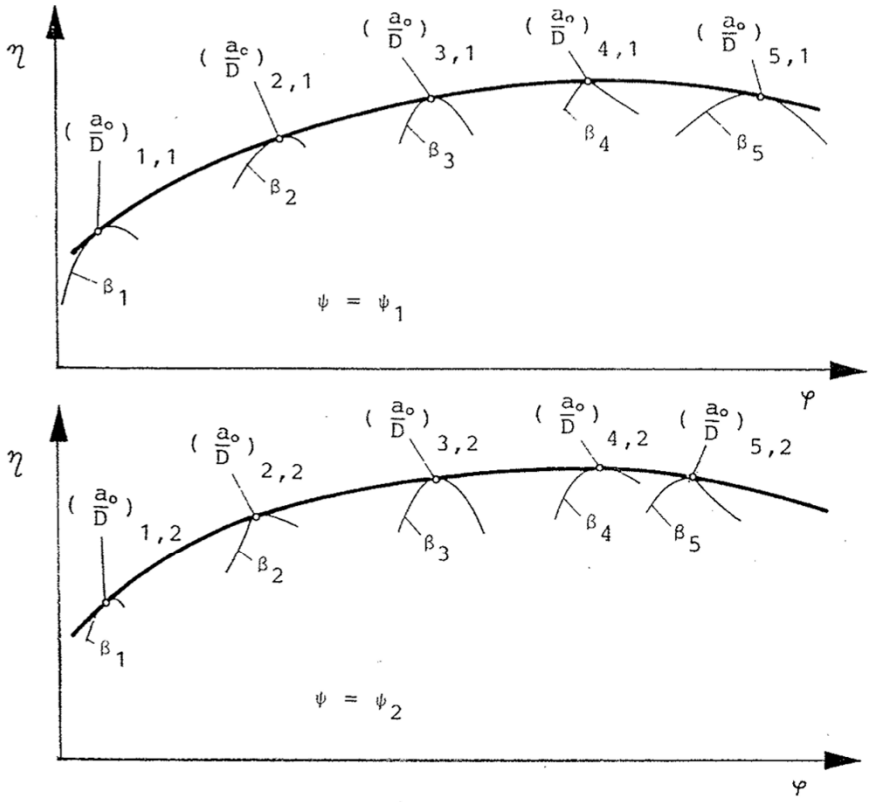
  Propellerturbinen

- Fahre mit verschiedenen β_i verschiedene Propellerkurven

- Einhüllende: Kaplan-Kurve

- Betriebspunkte: Berührungspunkte der Propellerkurve mit Kaplan-Kurve

- Wiederhole Verfahren für verschiedene Fallhöhen bzw. ψ



i ..... Index f. Laufradstellung β

j ..... Index f. Fallhöhe bzw. Druckziffer ψ

$\left(\frac{a_0}{D}\right)_{i,j}$ ... rel. Leitapparatöffnung

β ... Laufradstellung [°]

- Ergebnis: unterschiedliche Kaplan-Kurven

  → Vorschrift für optimale Zuordnung:

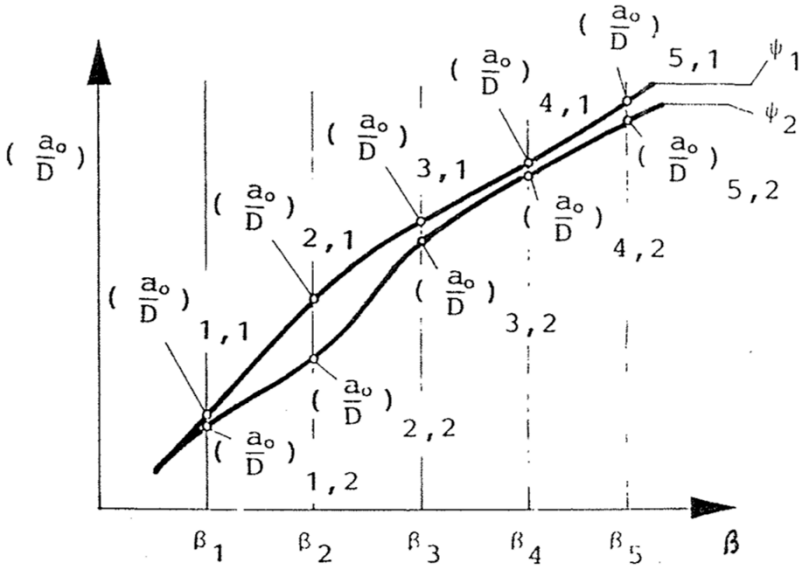
  Laufradstellung ← → Leitradstellung

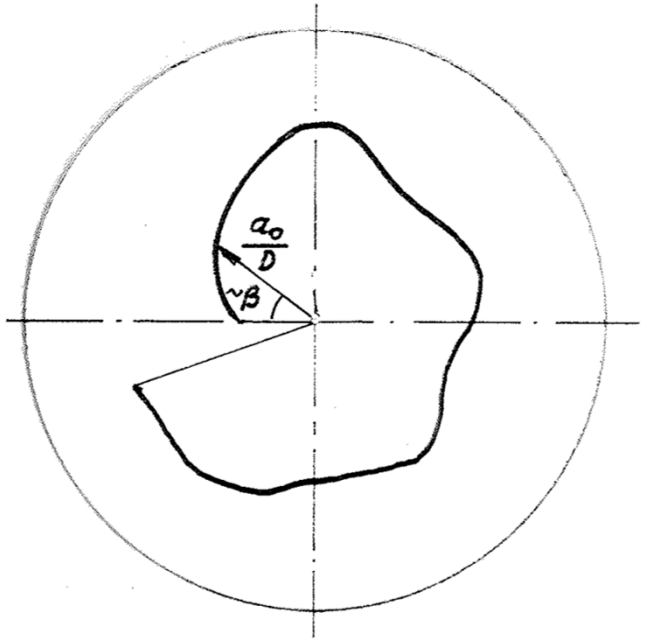
früher: Kurvenscheibe bei konstantem ψ

Kurvenwalze bei variablem ψ

heute: elektronische Regelung

- Zuordnung Laufrad ← → Leitrad am Modell zu ermitteln. Für zuverlässige Ergebnisse müssen auch Spirale und Saugrohr zwischen Modell und Großausführung exakt ähnlich sein.





Messung in der Anlage: Winter Kennedy

Direkte Wirkungsgradmessung in der Anlage: scheidet aus wegen Aufwand der Durchsatzmessung

Möglichkeit = **indirekte** Messung

Ansatz:

1. Geschwindigkeitsverteilung in einem Querschnitt zwischen Einlauf und Stützschaufeln
   - 1.1 von Durchsatz abhängig
   - 1.2 von Leitradöffnung abhängig
   - → konstant: n, H, β

2. In bestimmten Durchsatzbereichen ist die Geschwindigkeitsverteilung nicht oder nur schwach von der Leitradstellung abhängig

→ Geschwindigkeit ≈ Durchsatz

- Energiesatz (Bernoulli) zwischen zwei Punkten „A“ und „B“

$$\frac{p_A - p_B}{\rho g} + z_A - z_B = \frac{{c_B}^2 - {c_A}^2}{2g} = \left(\frac{1}{{A_B}^2} - \frac{1}{{A_A}^2}\right) \cdot \frac{Q^2}{2g} = K \cdot Q^2$$

$$Q = \sqrt{\frac{1}{K}} \cdot \sqrt{\frac{p_A - p_B}{\rho g} + z_A - z_B} = C \cdot \sqrt{\frac{p_A - p_B}{\rho g} + z_A - z_B}$$

- Turbinenwirkungsgrad

$$\eta_{TU} = \frac{P_{Gen}}{QH\rho g\eta_{Gen}} = \frac{P_{Gen}}{C \cdot \sqrt{\frac{p_A - p_B}{\rho g} + z_A - z_B} \cdot H\rho g\eta_{Gen}}$$

$$\eta_{TU|_{indirekt}} = \eta_{TU} \cdot C = \frac{P_{Gen}}{C \cdot \sqrt{\frac{p_A - p_B}{\rho g} + z_A - z_B} \cdot H\rho g\eta_{Gen}}$$

Der **indirekte Wirkungsgrad** sagt nichts über das η_{TU} Niveau aus…

…solange aber C konstant bleibt, wird eine auch über den indirekten Wirkungsgrad zuverlässige Aussage darüber getroffen, ob η_{TU} **ein Maximum** wird oder nicht.

C muss nur über ein kleines

Intervall Q konstant bleiben.

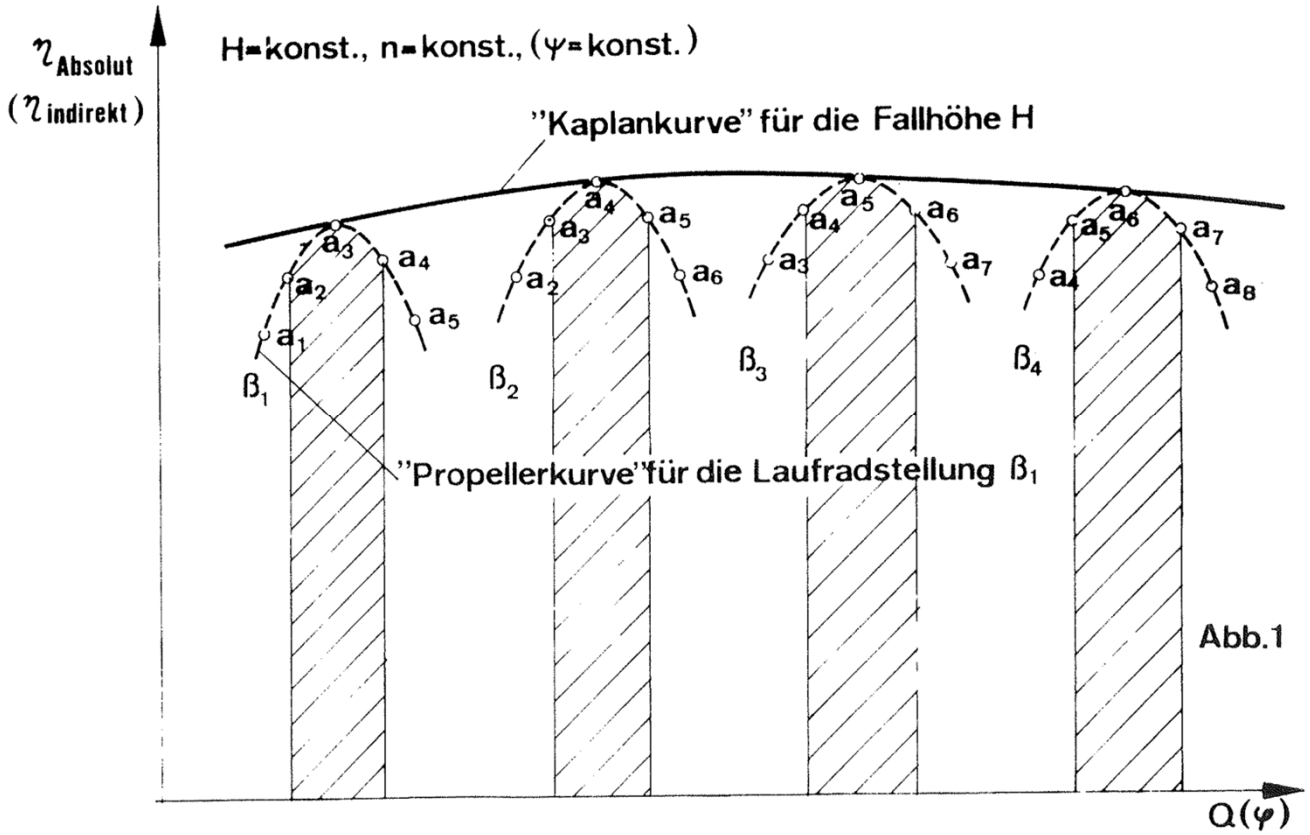


Abb.1

- Messung der Fallhöhe

  Differenz zwischen Oberwasser und Unterwasser

  Unter Berücksichtigung von Eintritts- und Austrittsverlusten

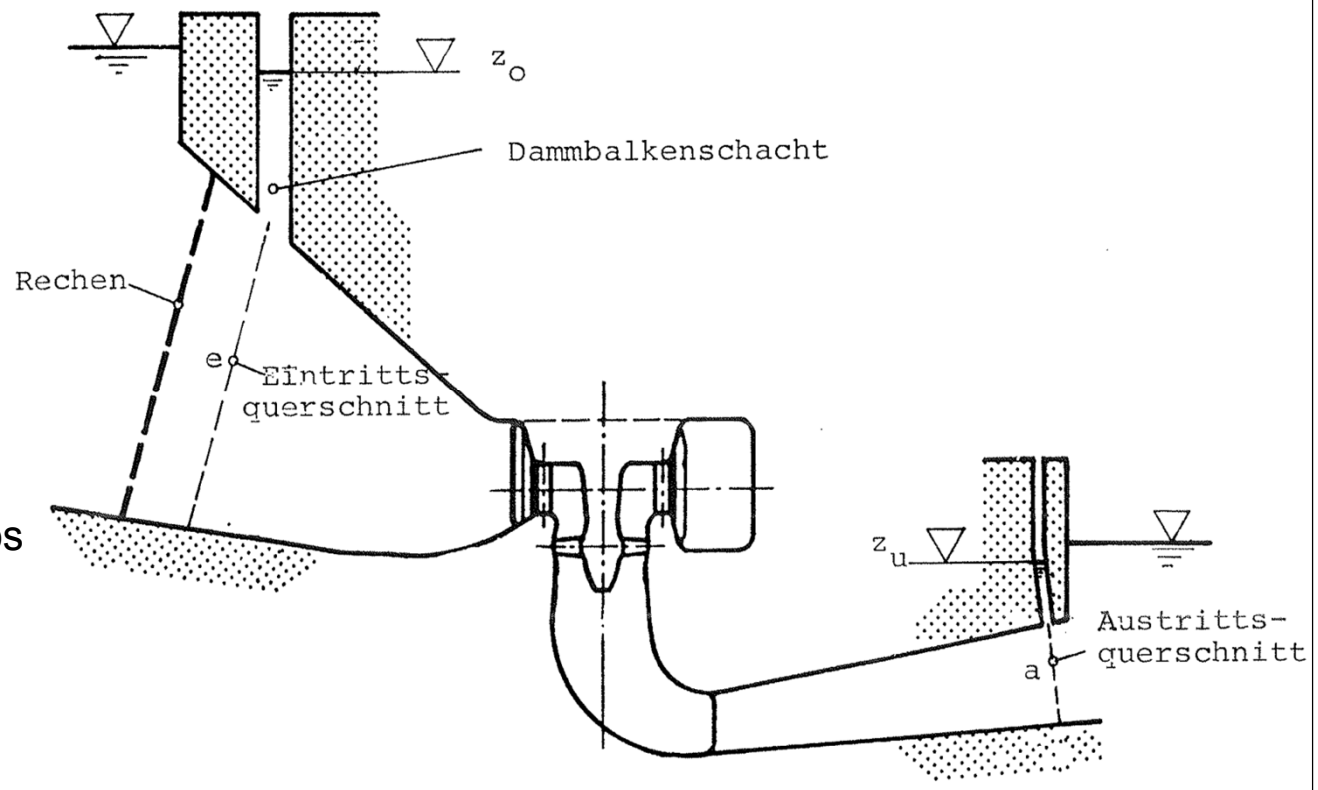
$$H = z_o - z_u + \frac{{c_e}^2 - {c_a}^2}{2g}$$

$$c_e = \frac{Q}{A_e}\ ,\ c_a = \frac{Q}{A_a}$$ mit Q laut

  Herstellerangaben bei geg. Leistung

  Genauere Ermittlung unnötig, weil

$$\frac{{c_e}^2 - {c_a}^2}{2g} \ll z_o - z_u$$



- Beharrungszustand des Anlagenbetriebs

- Laufschaufel-/Leitschaufelstellung mit Messuhren kontrollieren

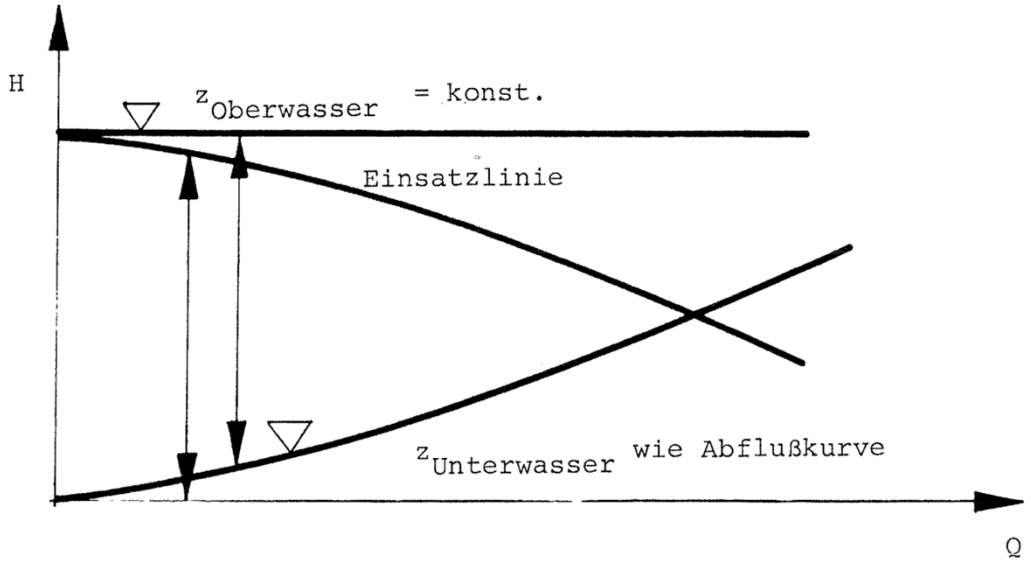
- Optimale Zuordnung Laufrad-/Leitrad wird für verschiedene H ermittelt

- Kleine Maschinen (Laufkraftwerke an Flüssen):

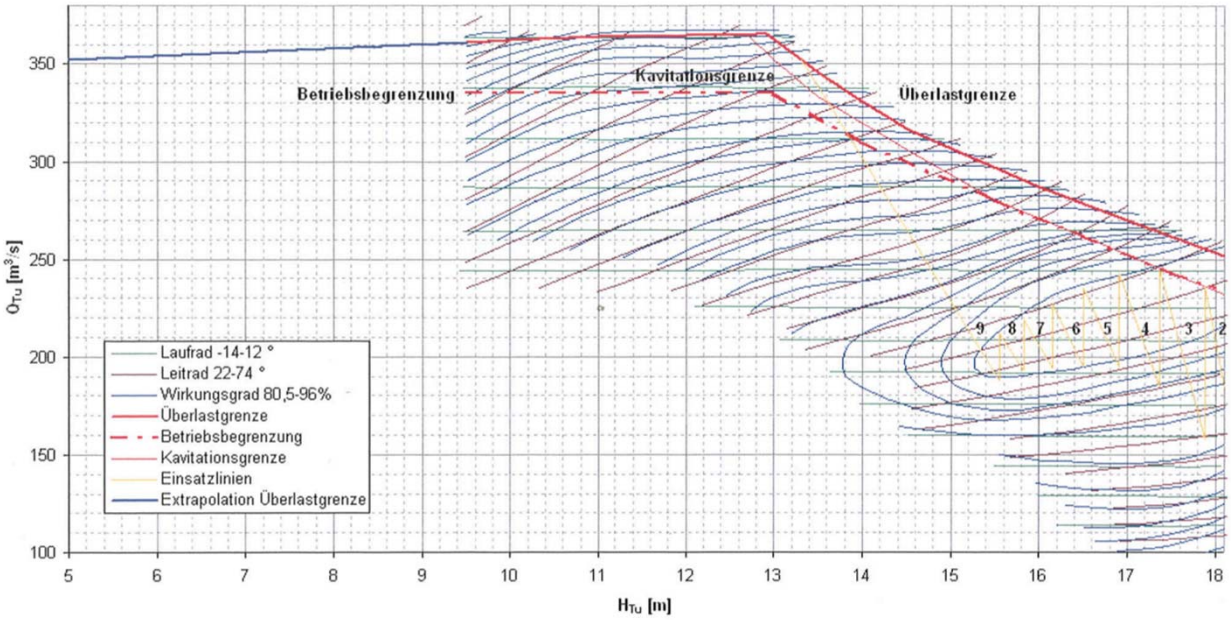
  Optimale Zuordnung entlang Einsatzkennlinie H(Q)

  Annahme:

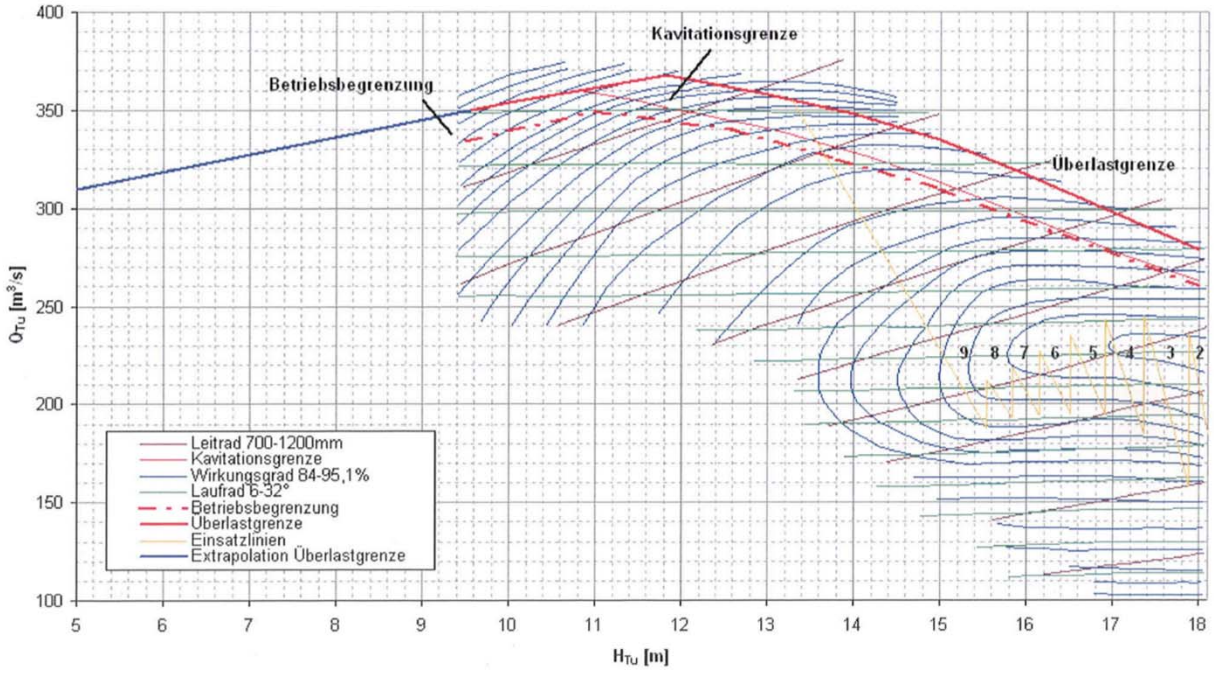
  - Kein Wasser über Wehr
  - Oberwasserpegel konstant
  - Unterwasserpegel entsprechend Abfluss



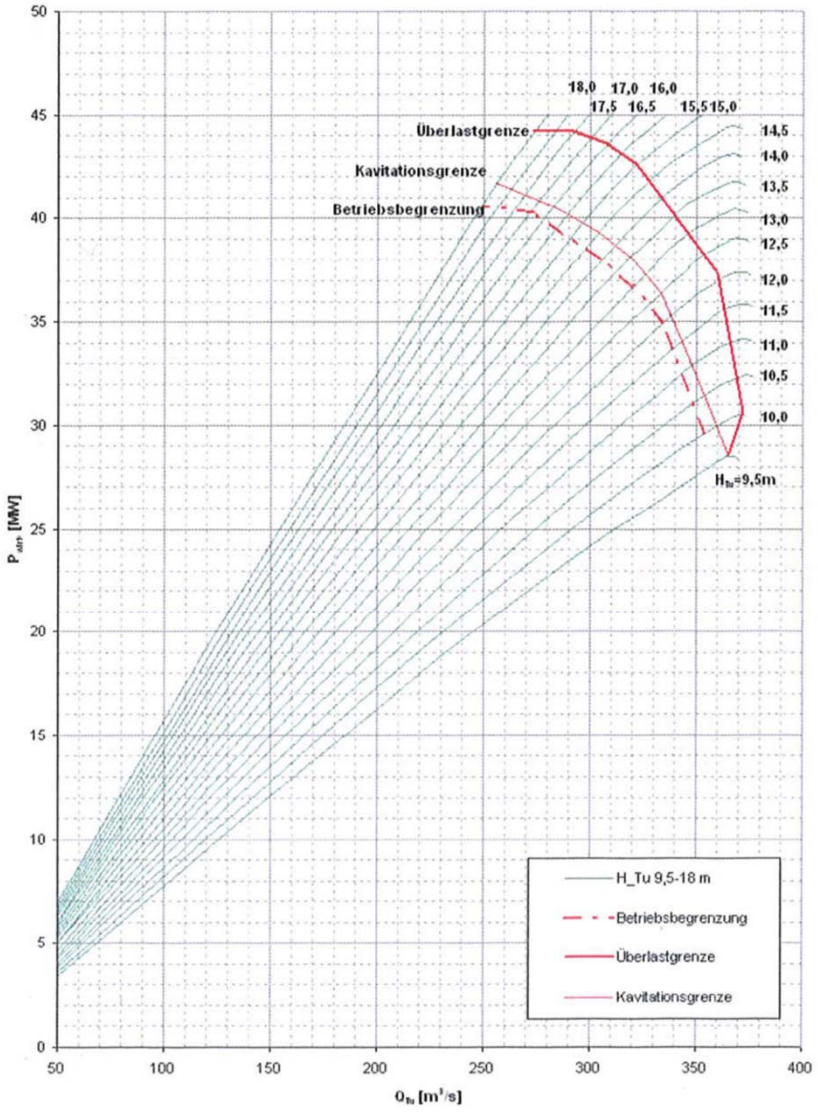
Einsatzlinie am Beispiel eines Fluß-Kraftwerkes mit konstanter Kote Oberwasser, variabler Kote Unterwasser.



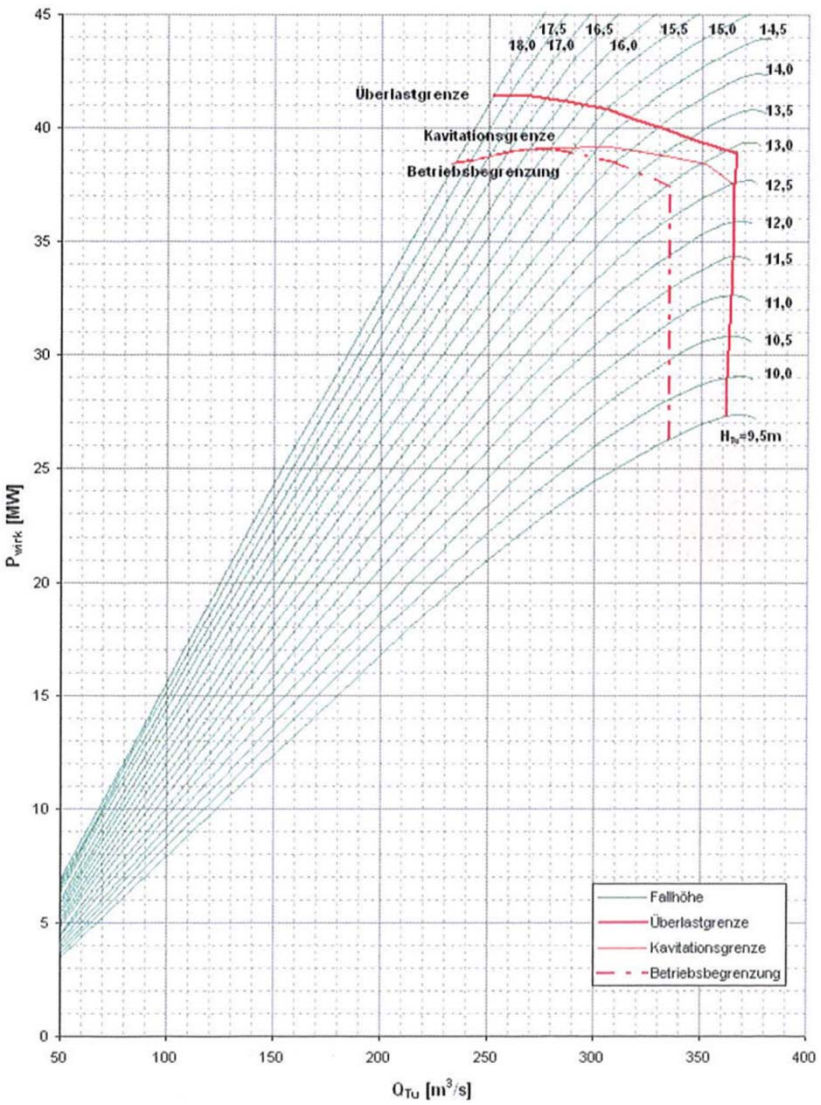
Maschinenkennfeld HM 4-6



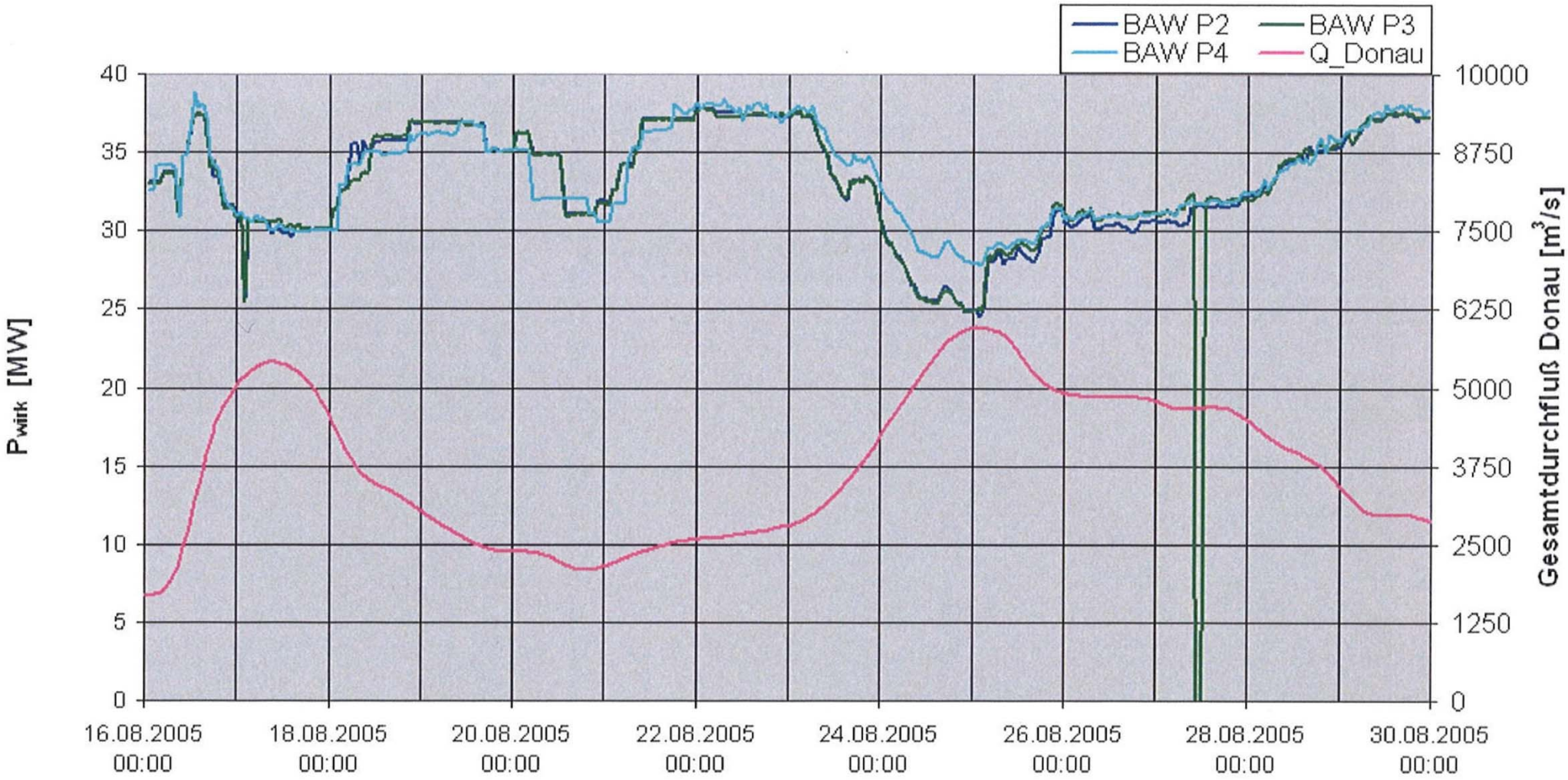
Maschinenkennfeld HM 7-9



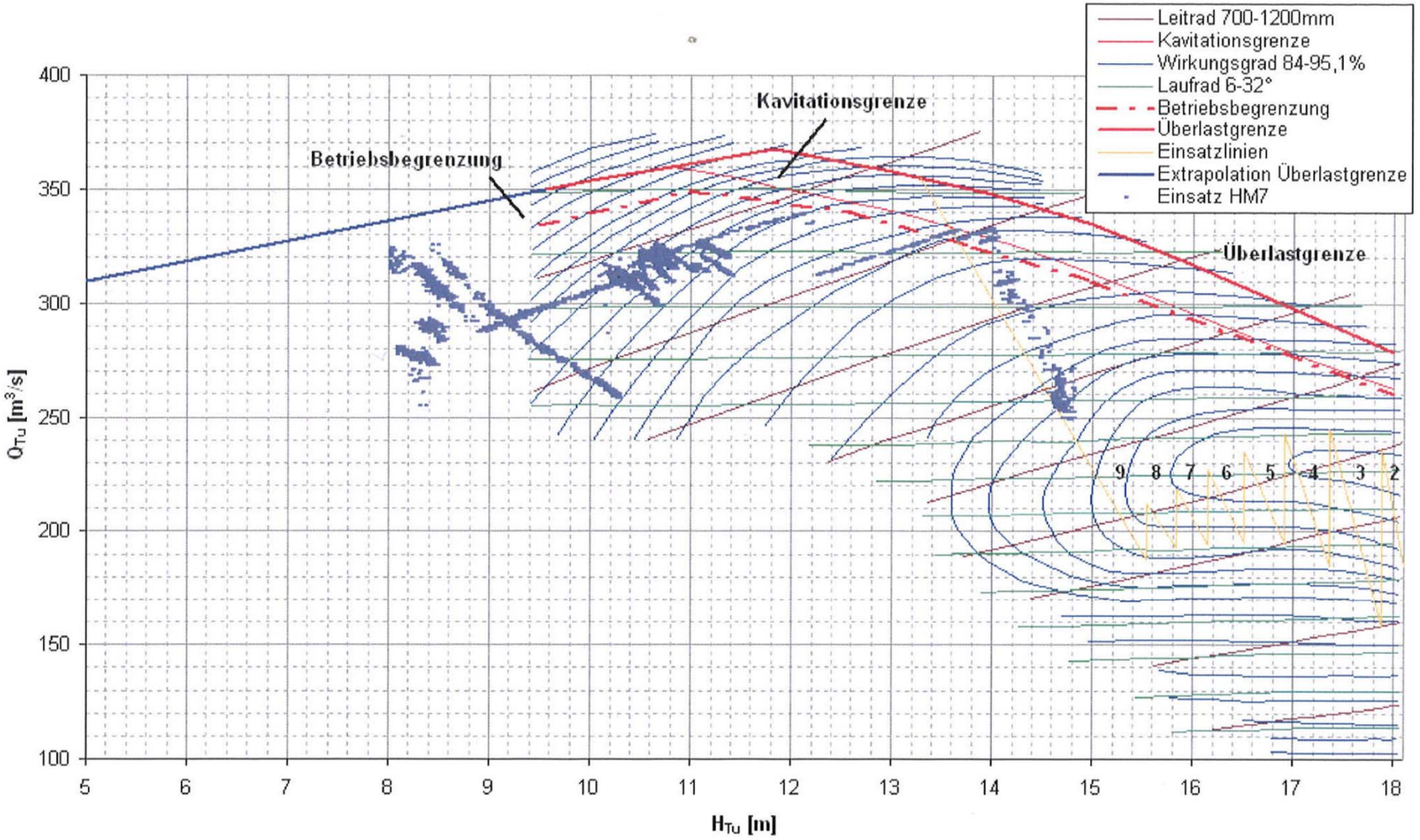
PQ-Diagramm HM 1-3



PQ-Diagramm HM 4-6



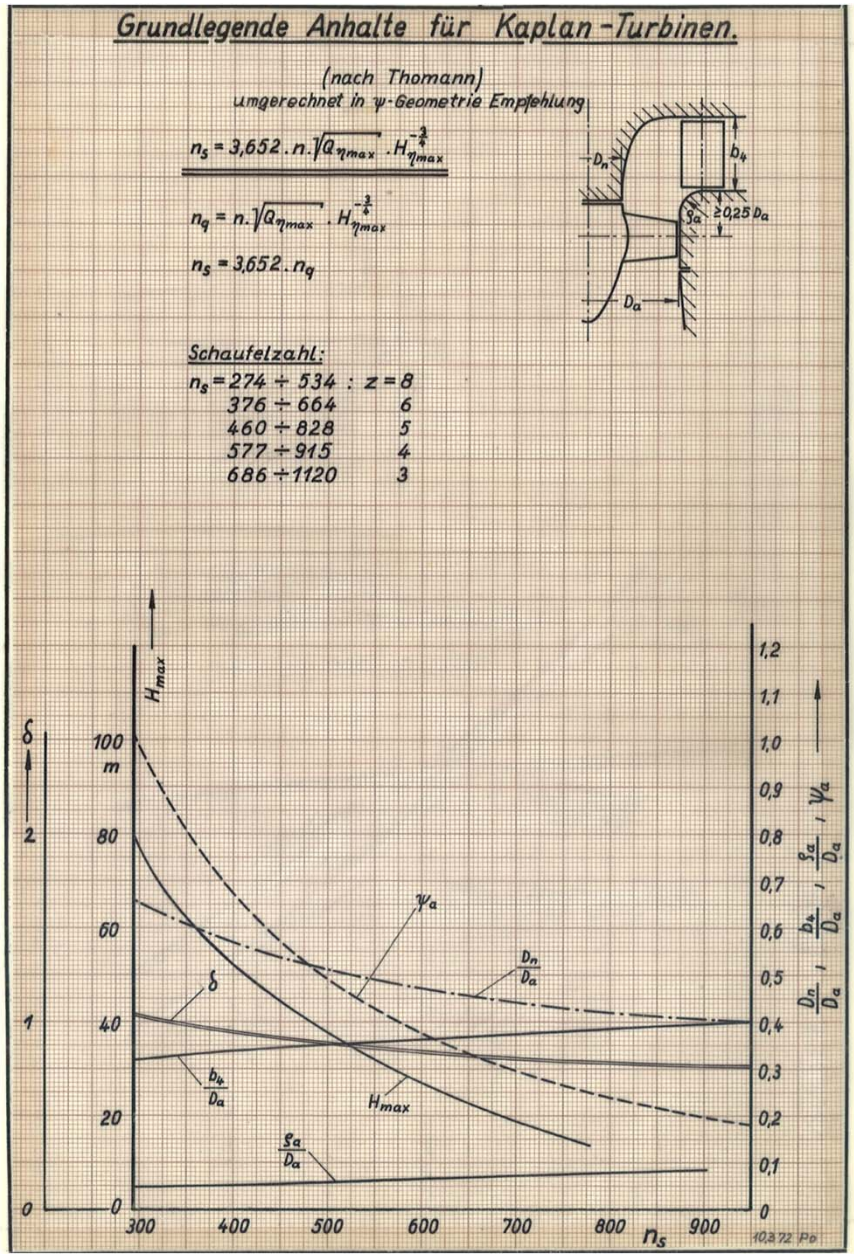
Einsatz HM 2-4 Hochwasser August 2005



Einsatz im Maschinenkennfeld HM 7 - KW 09/2007

Schaufelauslegung

- Thomann Anhalte für Turbinenhauptabmessungen
- Schaufelauslegung für Laufrad/Leitrad
  - NACA auf Teilfluträdern
  - Konventionelle Gitterdaten
  - Singularitäten-Verfahren
  - Stromlinien-Krümmungsverfahren
  - u.U. 3D-Verfahren
- Wegen $u = u(r)$ entstehen immer verwundene Schaufeln



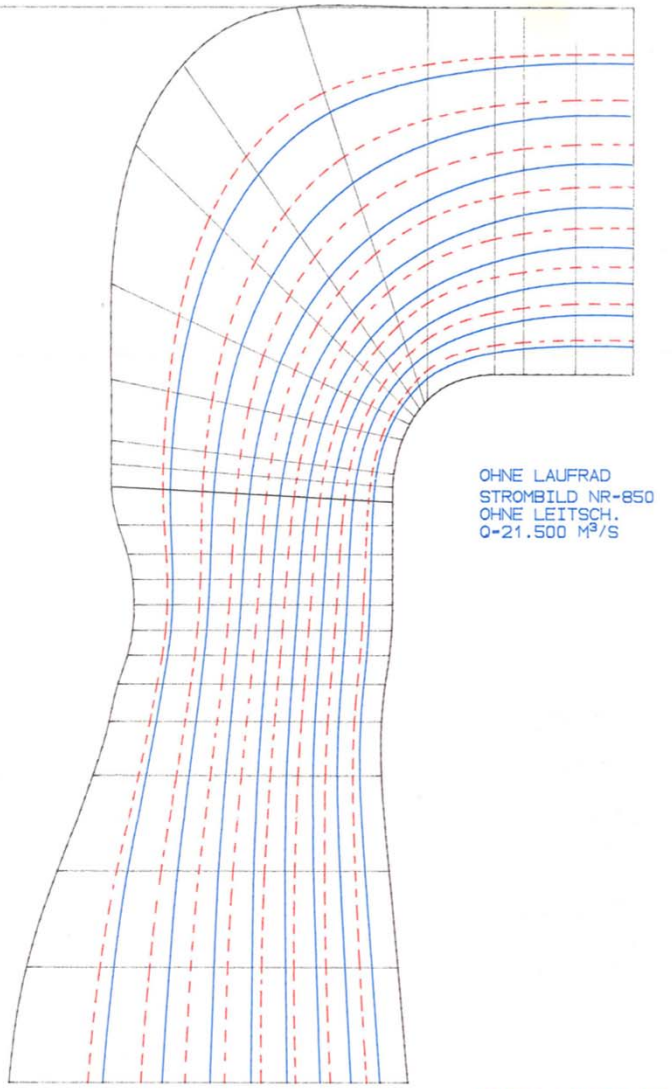


Abb. III.30: Stromlinien für die Strömung durch den Leitapparat allein: voll ausgezogen drallfrei. Gestrichelt Leitschaufelwinkel wie Auslegungspunkt.

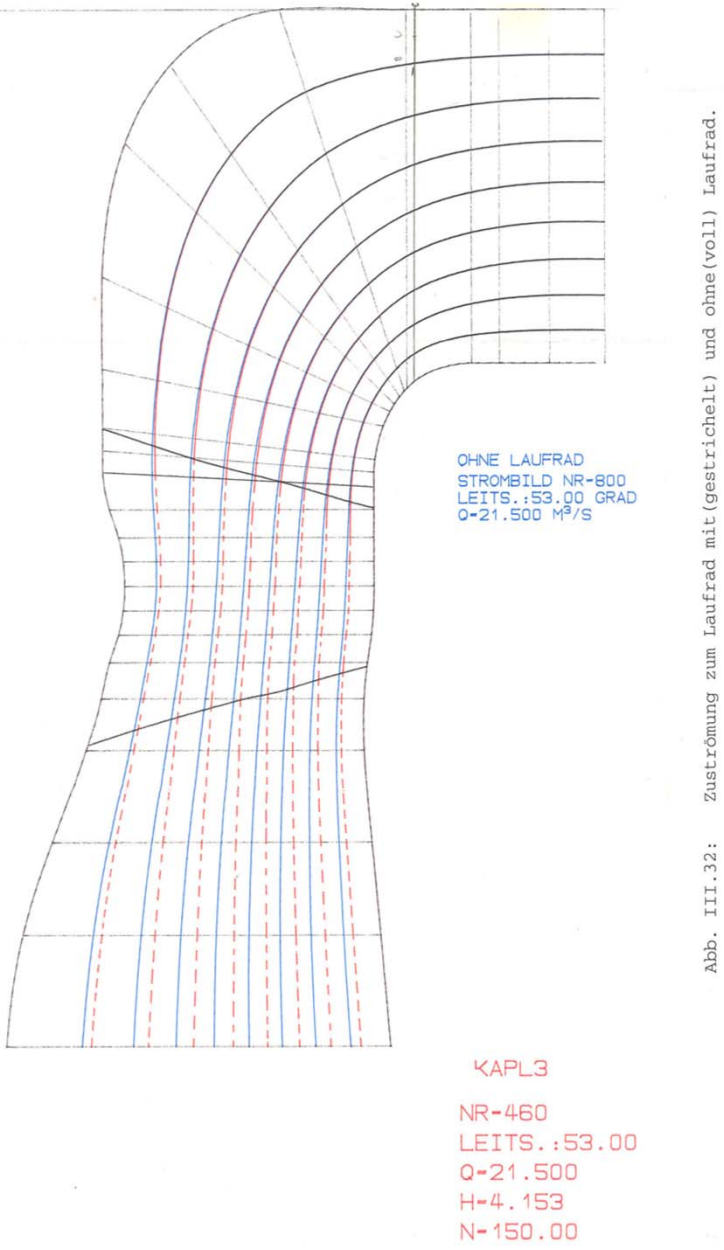


Abb. III.32: Zuströmung zum Laufrad mit(gestrichelt) und ohne(voll) Laufrad.